В. Ф. Венда

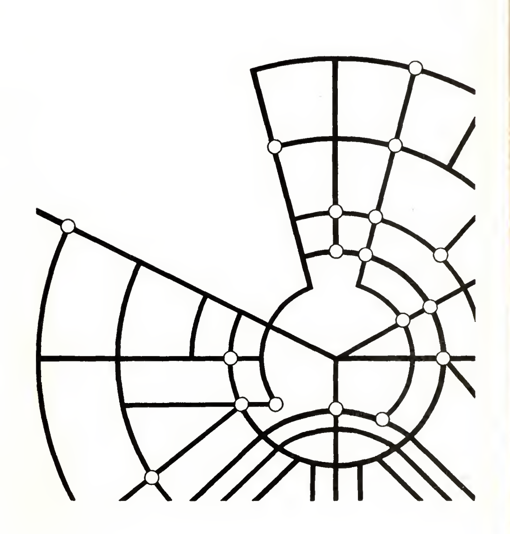
Инженерная психология

и синтез систем отображения информации

«Фундаментальное значение
инженерной психологии
состоит в том, что она
открывает реальные пути
совершенствования новой
техники и производства и
одновременно с этим ставит
людей в наилучшие,
оптимальные условия
работы с этой техникой.»

Чл.-кор. АПН СССР проф.
Б. Ф. ЛОМОВ

Инженерная



В. Ф. Венда

ПСИХОЛОГИЯ

и синтез систем отображения информации



Издательство «Машиностроение» · Москва · 1975

6Ф0.1
В29
УДК 62—506 : 621.316.34.085.3

Рецензент канд. философ. наук **А. М. Пашутин**

Венда В. Ф.

В29 Инженерная психология и синтез систем отображения информации. М., «Машиностроение», 1975.

396 с. с ил.

В монографии излагаются методы и результаты инженерно-психологических исследований и проектирования оперативных и диспетчерских средств на основе выдвинутых автором структурно-психологических концепции синтеза и многоуровневой адаптации информационных систем к деятельности операторов.

Издание предназначено для психологов, эргономистов, системотехников, специалистов в области инженерно-психологических проблем АСУ, исследователей, проектировщиков и художников-конструкторов, работающих над созданием систем и средств отображения информации.

В $\frac{30501\text{-}005}{038(01)\text{-}75}$ 5-75 6Ф0.1

Предисловие

Широкое распространение АСУ выдвинуло обширный комплекс проблем, связанных с оптимальной организацией деятельности операторов в системах управления. Важное место среди них занимает разработка наиболее рациональных форм представления информации человеку.

Первоначально особенно остро стоял вопрос о расширении арсенала контрольно-измерительной и индикационной техники. Однако впоследствии бóльшую актуальность приобрел вопрос о методах отображения разнообразнейшей оперативной информации, способствующих более быстрому, точному и надежному выполнению человеком-оператором своих функций и значительному повышению эффективности АСУ. Задача особенно усложняется тем, что в отличие от вычислительной техники, средств связи и другого серийно выпускаемого оборудования системы отображения информации в каждой АСУ индивидуальны, поскольку индивидуальны функции операторов.

В соответствии с обширными планами внедрения АСУ во все отрасли народного хозяйства в стране создаются тысячи проектов пультов управления и систем отображения информации, поэтому очевидна насущная необходимость в создании и распространении инженерно-психологических основ проектирования информационных систем. Различным аспектам этой проблемы посвящены многие труды советских и зарубежных психологов, системотехников, специалистов по системам и средствам отображения информации. Вместе с тем опыт показывает, что отсутствие психологической теории синтеза многокомпонентных систем отображения информации резко снижает эффективность и самую возможность практического применения инженерно-психологических рекомендаций, которые

в большинстве своем носят фрагментарный, разрозненный, а нередко и противоречивый характер.

Необходимым этапом создания такой теории является разработка методов соотнесения сложности деятельности человека-оператора с составом и структурой системы отображения информации. Известные в инженерной психологии методы основаны на искусственном выделении и изолированном экспериментальном изучении отдельных психических процессов, включенных в деятельность оператора. Полученные таким образом экспериментальные результаты не соответствуют данным наблюдений реальной деятельности операторов АСУ.

Проблема адекватности лабораторных и теоретических моделей реальной деятельности оператора заняла в инженерной психологии в последнее десятилетие одно из центральных мест. Особенно большое значение ее разработка имеет для повышения эффективности использования результатов психологических исследований в решении научных и практических задач организации деятельности операторов сложных АСУ и дальнейшего развития управляющей вычислительной техники. Прогресс в решении этой проблемы нередко тормозится из-за стремления некоторых авторов экстраполировать на деятельность операторов АСУ данные лабораторных экспериментов и теоретические обобщения исследований процессов решения задач, резко отличающихся от типичных для АСУ по структуре, сложности и специфике мотивационно-личностной сферы. Сюда относятся разного рода игры, а также элементарные задачи комбинаторного типа, характерные для простейших видов операторских профессий. Длительный психологический анализ в реальных и лабораторных условиях и инженерно-психологическое проектирование технических средств деятельности операторов семи крупных АСУ особенно отчетливо убедили в важности выявления и точного учета на базе общей психологической теории деятельности, развиваемой в трудах А. Н. Леонтьева, Б. Ф. Ломова и других советских психологов, основных характеристик и особенностей реальной деятельности путем комплексного использования специально подобранного набора методов и средств исследований с последовательным повышением адекватности моделей.

Подход к изучению деятельности операторов с таких методологических позиций иллюстрируется в книге циклом экспериментальных исследований, направленным на выбор оптимального типа средств отображения информации и числа одновременно воспринимаемых и отслеживаемых оператором параметров технологического объекта. После длительного психологического анализа деятельности операторов на объекте и выявления характерных задач в одной из лабораторных серий испытуемым предъявлялись реальные индикаторы, сигналы на которые поступали от ЭВМ, воспроизводившей математическую модель регулируемого объекта. Таким образом, дина-

мика каждого сигнала в опыте была весьма близка к реальной. Затем при переходе к потокам сигналов их статистические характеристики были взяты из данных наблюдения в реальных условиях.

В дальнейшем результаты этих лабораторных экспериментов, в которых математически точно, но в индифферентных для испытуемых условиях, воспроизводились оперативные задачи, были дополнены анализом деятельности операторов непосредственно в стрессовых условиях, создававшихся в ходе экспериментальных (но внезапных для операторов) аварий на реальном объекте. При этом был выявлен ряд существенных неточностей лабораторных моделей и обнаружены новые важные факты. В частности, наряду с общепринятым в экспериментально-психологической практике вопросом о вероятном пропуске критических сигналов для реальных операторов оказалось весьма типичным также и обратное явление — завышение значимости второстепенных сигналов и непроизвольное включение их в число критических, что существенно увеличивало общее время ликвидации аварий. В связи с этим в книге выдвинута и исследуется проблема оперативной адаптации структуры информационной системы к конкретной деятельности человека, в частности, демпфирования информационных потоков при авариях на объекте путем анализа приоритетов и временной задержки второстепенных сигналов.

Еще сложнее оказалось достижение адекватности лабораторных результатов реальной деятельности при разработке систем отображения информации и организации деятельности операторов и диспетчеров, управляющих крупномасштабными рассредоточенными системами. При исследовании деятельности диспетчеров объединенных энергосистем выяснилось, что в экспериментах по оценке вариантов структуры системы отображения информации могут участвовать только диспетчеры конкретного энергообъединения, настолько сложны задачи и велика роль знаний о системе, не отраженных на средствах отображения информации. Для стимулирования мотивационной сферы эксперименты были включены в план противоаварийных тренировок и аттестации диспетчеров. Проведение исследований стало возможным благодаря участию в них в качестве «ведущего» опытнейшего диспетчера, мысленно моделировавшего и воспроизводившего реакции системы, не поддающейся моделированию на ЭВМ, на реализацию решений, которые принимали испытуемые — диспетчеры. Ограниченность выбора испытуемых потребовала введения специальных психологических критериев сложности решения аварийных задач, основанных на содержательном анализе процессов решения. Соответствие лабораторных и теоретических моделей реальной деятельности операторов следует рассматривать как категорию вероятностную с указанием границ их применимости к конкретным задачам и условиям деятельности. Адекватность может

быть повышена путем выявления характеристик реальной деятельности, наиболее существенных в плане конкретной цели инженерно-психологического исследования или проектирования, с проверкой различными методами и постоянным соотнесением моделей с реальной деятельностью.

Аналогично должен решаться вопрос адекватности технических средств структуре деятельности. Вероятность соответствия жесткой конструкции реальной деятельности конкретного индивидуума, как правило, с повышением сложности деятельности резко снижается.

Для максимально эффективного использования специфических способностей человека в системе управления необходима последовательная, многоуровневая адаптация технических средств и внешних условий к деятельности оператора с целью ее оптимизации.

Первым, наиболее грубым приближением является *тотальная адаптация*, основанная на учете общих для всех людей психофизиологических закономерностей. Следующий шаг — это *контингентная адаптация*, в соответствии с которой производится приспособление конструкции и параметров технических средств к психофизиологическим характеристикам контингента операторов, допущенного к данной деятельности. Далее следует *функциональная адаптация* — учет особенностей выполняемых операторами функций и общей психологической структуры деятельности.

Этими тремя уровнями ограничивается в настоящее время инженерно-психологическое приспособление техники к человеку-оператору в АСУ. Однако опыт показывает, что организация технических средств и условий деятельности операторов высших иерархических ступеней на основе таких среднестатистических данных приводит иногда к большим потерям, поскольку принципы отбора операторов и применяемые конструкторами справочные инженерно-психологические данные лежат в непересекающихся областях. Для таких случаев мы считаем необходимым введение в дальнейшем кроме определенных выше еще двух уровней адаптации — индивидуальной и оперативной. *Индивидуальная адаптация* предполагает подгонку конструкции к индивидуальным особенностям каждого человека-оператора, а *оперативная адаптация* — изменение технических средств и условий деятельности в зависимости от текущего конкретного психофизиологического состояния человека и показателей эффективности его деятельности.

Таким образом, в области психологического анализа и моделирования сложных видов деятельности операторов АСУ с многокомпонентными средствами отображения информации наиболее эффективными в настоящее время представляются вероятностные подходы с развитием идей многоуровневой адаптации технических средств к деятельности человека-оператора.

Вероятностные методы наиболее соответствуют вероятностной природе психического отражения АСУ и процессов решения человеком сложных оперативных задач. За исключением тех случаев, когда набор состояний объекта очень беден, а задачи повторяются неоднократно, последовательность этапов решения и психологическое содержание каждого из них колеблются в широких пределах. По этой причине применение развитых на примере простых видов деятельности детерминистских методов ее описания, основанных на предположении об одноканальности психологических механизмов и строгой последовательности этапов обработки информации, ограничено лишь частными случаями.

Исходя из этого, исследование инженерно-психологических проблем синтеза СОИ ведется в книге с позиций *структурно-психологической концепции*, суть которой сводится к тому, что структура системы отображения информации статистически обусловливает стратегии (предпочтительные способы) и сложность решения операторами задач по управлению объектом. При этом цель оптимального синтеза систем отображения информации конкретизируется как максимальное приближение реальных значений психологических факторов сложности решения оперативных задач к их оптимальным значениям. Концепция служит основой совместного применения разработанных советской психологией методов анализа структуры внутренних психических процессов, комплекса современных экспериментальных средств и математического аппарата. Потенциально концепция может быть распространена не только на инженерно-психологические исследования и проектирование СОИ, но и другие технические средства деятельности человека.

В отличие от известных данный подход позволяет не только констатировать различия между несколькими вариантами систем и средств отображения информации, но и выявлять психологическую основу этих различий, анализировать отдельный вариант структуры с определением степени ее оптимальности, направления и средств совершенствования, формулировать общие психологические принципы выбора структуры многокомпонентных средств отображения информации (СОИ), а в дальнейшем, возможно, создать и методы их расчета.

Выдвинутая концепция охватывает весь теоретический диапазон статистических связей структуры (стратегии) отображения информации и стратегии решения, поэтому она может служить основой не только анализа известных, но и поиска принципиально новых типов информационных систем и средств. Полноту и замкнутость охвата связей можно проверить, если, представив статистические связи, например, в виде коэффициентов корреляции ($-1 < R < 1$) и выразив сложность решения в относительных единицах ($1 < \Omega < \infty$), рассмотреть основные интервалы и границы значений R и Ω.

В книге такой анализ проводится с привлечением большого экспериментального материала.

Случаю $R \to 0$ при $\Omega \to 1$ соответствует свертывание процесса решения оперативных задач при ограниченном их наборе и многократном повторении в ходе обучения. Реальные различия между вариантами структуры системы отображения информации становятся исчезающе малыми и статистически недостоверными. Этому частному случаю соответствуют, например, эксперименты по изучению редукции движений глаз с использованием простых мнемосхем, малого набора задач с доведением времени их решения до стабильного уровня («плато» на графике обучения) путем тренировки испытуемых. В реальных АСУ и при сложных многокомпонентных системах отображения информации такая замена процессов решения реакцией выбора практически недостижима. Нами показано, что для получения в исследованиях по психологической оценке СОИ результатов, соотносимых с реальной деятельностью операторов и полезных для синтеза систем отображения информации в АСУ, эксперименты должны планироваться с применением стохастических моделей обучения или путем сопоставления процессов и результатов решения задач испытуемыми и опытными операторами.

Случай $R \to 0$, $\Omega \to \infty$ также не представляет интереса для практики проектирования СОИ для АСУ. Он соответствует ситуациям, когда оперативные задачи решаются без опоры на СОИ, например, если способ кодирования информации на СОИ не известен человеку (неподготовленный оператор) либо объем отображаемой информации явно недостаточен для решения возникшей задачи, либо не обеспечены психофизические условия восприятия информации.

Интервалу значений $-1 < R < 0$ соответствуют в основном случаи решения проблемных оперативных задач, не предусмотренных разработчиками СОИ, когда оператор вынужден преодолевать неадекватность структуры СОИ сложившейся на управляемом объекте реальной ситуации. Здесь мы сталкиваемся с парадоксом, заключающимся в том, что чем лучше структура СОИ отработана инженерно-психологически и облегчает решение конкретных, заранее выявленных и формализованных оперативных задач, тем труднее оператору решать непредвиденные, особенно проблемные задачи. Поэтому для интервала $-1 < R < 0$, как правило, характерна максимальная сложность решения ($\Omega \to \infty$). Анализ этого случая приводит к практическому выводу, что для обеспечения оператору возможности решения проблемных задач при синтезе СОИ неизбежно завышение объема выводимой информации и применение неформальных методов, основанных на методологическом системном подходе, развиваемом Б. Ф. Ломовым, В. П. Кузьминым, а также структурно-эвристической концепции В. Ф. Рубахина.

Граничному случаю $R \to 1$ соответствует применение теоретически предсказанных нами и нашедших впоследствии практическое применение «абстрактных» СОИ, выступающих в процессе решения оперативных задач, по-сути, в качестве объекта управления. При этом может быть максимально снижена сложность решения ($\Omega \to 1$), если, например, по командно-информационному принципу отображается точный алгоритм решения задач. Напротив, $\Omega \to \infty$, если отображаемый алгоритм ошибочен, а СОИ и процесс решения абстрагированы от конкретного содержания управляемых физико-технологических процессов.

Наиболее подробно в книге изучен интервал связей структуры СОИ и стратегии решения оперативных задач $0 < R < 1$, соответствующий обширнейшему классу «ассоциативных» СОИ. Экспериментально выявлены основные психологические факторы сложности оперативных задач, статистически обусловливаемые структурой СОИ. Среди факторов — число актуализируемых связей разных типов между элементами объекта, оперативный объем отображения, число операций в алгоритмах принятия и реализации решения, число ступеней взаимовлияния параметров, число оперативных единиц восприятия, число конкурирующих вариантов решения, коэффициент интерференции. При выборе психологических факторов сложности оперативных задач в каждом отдельном случае к ним должны предъявляться такие требования, как статистическая достоверность количественных значений, их зависимость от структуры СОИ, положительная статистическая связь с критериями сложности решения (время, число ошибок, число фаз глазодвигательного поведения), высокий коэффициент множественной корреляции выбранной совокупности факторов с критерием сложности. С целью выявления психологических принципов выбора структуры многокомпонентных графических СОИ для АСУ был проведен обширный цикл психологических экспериментов, в которых изучалось статистическое влияние на деятельность таких характеристик СОИ, как число одновременно воспринимаемых информационных элементов, обособленное отображение и зрительное выделение контуров мнемосхемы, относящихся к предъявляемым оперативным задачам, с целью поиска рациональных способов представления инструкций и управления вниманием человека. Разработан принцип регулирования интенсивности потоков сигналов для ее адаптации к индивидуальным особенностям и текущему состоянию человека-оператора, проведено сравнительное исследование принципов разделения во времени и пространстве интегральной и детальной информации о состоянии сложнейшей АСУ объединенной энергетической системы. В экспериментах изучалась также статистическая связь динамических свойств управляемых объектов и показателей сложности процессов слежения при использовании приборов разных типов. На примере СОИ АСУ дви-

жением городского транспорта экспериментально исследованы возможности снижения сложности решения оперативных задач путем декомпозиции структуры СОИ разделением ее на автономно управляемые участки и согласованием пространственных структур интегральных средств отображения (мнемосхем) и детальных (дисплеев).

На основе результатов экспериментальных исследований сформулированы психологические принципы выбора структур СОИ, статистически обусловливающие снижение реальной сложности решения оперативных задач. Наиболее широко в проектах СОИ и экспериментальных исследованиях процессов решения реальных оперативных задач в качестве конкретного типа СОИ применялись мнемосхемы в комбинации с контрольно-измерительными приборами, ЭЛТ, дисплеями.

Мнемосхемы как конкретный тип информационных моделей представляют в экспериментально-психологическом плане значительный методический интерес, позволяя графически воспроизводить постоянную функционально-технологическую или топологическую структуру управляемого объекта (системы), варьировать степень подробности (полноты) отображения объекта, состав и компоновку информационных элементов, способ реализации мнемосхемы в лабораторных условиях, варианты оперативных задач и т. д. Кроме того, поскольку графические средства отображения информации в разных технических исполнениях находят очень широкое применение в АСУ ТП, исследование принципов построения мнемосхем или, более широко, принципов рационального представления человеку-оператору графической и знаковой информации, а также оптимального сочетания разных видов СОИ в научном и практическом отношении весьма важно и перспективно.

На основе экспериментальных данных разработаны методы определения состава графической информационной модели для детерминированной и стохастической систем, предложены способы наглядного графического представления человеку-оператору информации типа советов и рекомендаций ЭВМ.

Исследовано влияние типа информационных моделей динамических объектов и скорости протекания управляемых процессов на процессы предвидения (антиципации) при оперативном слежении параметров. Значение применения специальных типов интегральных СОИ на процесс решения оперативных задач изучалось на примере вновь разработанных «Компастабло» и групповой динамической информационной модели. Особое внимание уделено исследованию влияния структуры СОИ на процессы обучения операторов. С целью повышения скорости обучения, а также решения частично формализованных оперативных задач предложен особый тип условно-абстрактных СОИ — командно-информационные средства отображения.

Особенно большого объема экспериментальных исследований потребовало определение оптимального оперативного объ-

ема отображения. При расчете вариантов информационной системы с регулируемым оперативным объемом отображаемой информации применены методы теории массового обслуживания, статистических испытаний модели системы на ЭВМ, а также психологические эксперименты в условиях реальных аварий на энергоблоке. Учитывая одно из важных положений советской психологической школы — системный механизм многомодального восприятия, в число варьируемых в экспериментах факторов кроме состава СОИ были включены параметры внешней среды. Такой методический подход позволил обнаружить ряд фактов нелинейного влияния внешних условий на структуру деятельности при переходе из одной зоны условий в другую. Результаты исследований совместного влияния информационных факторов и факторов внешней среды позволили выдвинуть проблему поиска информационных предпосылок «гиперстабильности» деятельности при изменении параметров среды и сформулировать требования к перспективным исследовательским методам эргономики на этапе создания теории оптимального проектирования деятельности.

На основе разработанных психологических принципов выбора структуры многокомпонентных СОИ, анализа и классификации по конструктивным и инженерно-психологическим признакам современных и перспективных типов средств отображения информации рассмотрены инженерно-психологические и эргономические вопросы художественного конструирования информационных средств. При создании многокомпонентных СОИ большое значение имеет организация взаимодействия инженерной психологии (эргономики), системотехники и художественного конструирования. Особое внимание уделяется неформальным художественно-композиционным и аналитическим методам реализации сформулированных принципов выбора структуры СОИ. Необходимо заметить, что в рассматриваемой области аналитические методы исследований пока не доведены до уровня практических инженерных методов расчетов, основу исследований составляет эксперимент, включающий моделирование реальной деятельности человека-оператора и использование объективных критериев сравнения вариантов СОИ. Приводимый в книге математический аппарат, как правило, носит приближенный, оценочный характер. Как показано в работах В. Ф. Рубахина, В. И. Николаева, Г. Е. Журавлева, дальнейшее развитие и уточнение математических методов исследования человеко-машинных систем и применяемых в них СОИ имеют очень важное значение, но связаны с большими трудностями принципиального характера. Вместе с тем самостоятельное значение имеет обобщение практического опыта художественного конструирования информационных средств для АСУ ТП. В книге описывается применение психологических принципов компоновки мнемосхем на примере проектов

СОИ автоматизированного слябинга, крупного энергоблока, объединенных энергосистем.

Инженерно-психологические и художественно-конструкторские вопросы проектирования оперативно-диспетчерских средств рассматриваются также на примере системы централизованного телеавтоматического управления движением транспорта в г. Москве (системы «Старт»). Методика и высокая эффективность практического использования методов эргономического анализа деятельности операторов при реконструкции действующих предприятий показаны на примере операторского пункта аммиачного производства Щекинского химкомбината. Суммарный технико-экономический эффект практических работ, выполненных лабораторией АСУ ВНИИ технической эстетики под руководством автора, по внедрению излагаемых в книге инженерно-психологических принципов синтеза СОИ для АСУ ТП составил более 500 тыс. руб. в год.

Учитывая междисциплинарный характер проблемы оптимального синтеза СОИ и наблюдающиеся в литературе многообразие и разноплановость психологической и технической терминологии, в книге сделана попытка унифицировать и привести в терминологическое соответствие параллельные понятия информационных (технических, аппаратурных) и психических моделей.

С этой целью рассматриваются две пары основных моделей, достижение взаимного соответствия между которыми и составляет цель инженерно-психологического синтеза систем и средств отображения информации: информационная модель объекта — психическая модель объекта, оперативно-информационная модель объекта — оперативно-психическая модель объекта.

Информационная модель сложной АСУ реализуется в виде комплекса средств отображения информации. Совместно со средствами и алгоритмами предварительной обработки информации информационная модель составляет систему отображения информации.

Понятием «психическая модель» обозначено суммарное психическое отражение объекта, которое служит внутренней основой выполнения человеком-оператором всей совокупности возложенных на него функций. Психическая модель представляет собой онтогенетическое, стохастически обобщенное отражение объекта, корректируемое на основе реальных результатов решения оперативных задач, новых профессиональных знаний, навыков по управлению объектом. Таким образом, понятием «психическая модель» мы стремимся обобщить и заменить в сфере исследований и синтеза СОИ множество существующих терминов, таких как концептуальная модель, оперативный образ, мозговая модель и т. п., и добиться точного соотнесения с понятием информационная модель. Оперативно-информационная модель — это совокупность данных, отображаемых в ходе решения конкретной оперативной задачи автоматически или

по вызову оператора. На основе психической и оперативно-информационной моделей объекта формируется оперативно-психическая модель, являющаяся психическим отражением конкретного состояния объекта, специализированным для решения возникшей оперативной задачи. Учитывая своеобразие применяемой нами терминологии, подчеркнем, что оперативно-психическую модель характеризуют следующие основные свойства:

1. Неполное отражение объекта.

2. Вероятностная связь с оперативно-информационной моделью.

3. Системное отражение объекта, взаимосвязей между его элементами. Следствиями этого важного свойства являются многовариантный характер процессов решения, особое *явление системно-психологической индукции* и превышение реальных значений психологических факторов сложности оперативных задач над теоретическими, оптимальными.

4. Стохастическая природа оперативно-психической модели, обусловливающая *явление интерференции* приемов решения задач, генетическую адаптацию вероятностной структуры оперативно-психической модели и динамику субъективных распределений значений одних и тех же элементов объекта в различных ситуациях.

5. Многоуровневый характер и гетерогенность оперативно-психической модели — неоднородность отражения различных элементов управляемого объекта (системы) в зависимости от их значимости для решения возникшей оперативной задачи и характеристик оперативно-информационной модели, наличие доминантных элементов отражаемой ситуации.

6. Адекватность форм психического отражения объекта, меняющихся в зависимости от специфики объекта, функций человека по его управлению, конкретной оперативной задачи, способов представления постоянной и оперативной информации и других факторов.

Основанный на структурно-психологической концепции многоплановый теоретический и экспериментальный анализ соотношения оперативно-психических и оперативно-информационных моделей, направленный на разработку и внедрение инженерно-психологических принципов синтеза структур систем и средств отображения информации для АСУ ТП, составляет главную цель и содержание книги.

Доктор психологических наук *В. ВЕНДА*

1

Структурно-психологический подход к анализу и синтезу систем отображения информации

1.

Психологические проблемы построения систем отображения информации в АСУ технологических производств

2.

Экспериментальное исследование процессов решения оперативных задач по мнемосхеме

3.

Исследование влияния состава и структуры мнемосхем на сложность решения оперативных задач

4.

Информационные модели динамических управляемых процессов

Причина разрозненности, фрагментарности и даже противоречивости многих известных инженерно-психологических рекомендаций и методов кроется в отсутствии общей теоретической основы их разработки. Такое положение особенно неприемлемо в условиях современного перехода от исследования отдельных приборов и индикаторов к синтезу многокомпонентных систем отображения информации, предназначенных для операторов крупных АСУ. В качестве теоретической основы предлагается структурно-психологическая концепция, сформировавшаяся в результате длительных психологических исследований и организации деятельности операторов многих АСУ, позволяющая использовать возможности аппарата содержательного психологического анализа деятельности и строгих экспериментальных и детерминистских методов и преодолеть их прикладную ограниченность. Путем соотнесения теоретически оптимальных и реальных, получаемых из психологических экспериментов, значений факторов сложности решения оперативных задач определены основные принципы выбора состава и структуры средств отображения информации, которые реализованы и апробированы в ряде оригинальных типов и конструкций.

Глава

1

Психологические проблемы построения систем отображения информации в АСУ технологических производств

1

Психологические исследования деятельности операторов

Несмотря на значительные специфические особенности деятельности операторов, вытекающие из предъявляемых к ней жестких требований [76], при ее изучении оказываются эффективными методы психологических исследований различных видов деятельности человека, длительно развиваемые мировой психологической наукой.

Распространение труда операторов сложных систем совпало с бурным развитием кибернетики. Наряду с положительным влиянием, в некоторых случаях кибернетика способствовала распространению механистических взглядов на деятельность человека в системе, выразившихся, в частности, в попытках подменить глубокий психологический анализ деятельности человека созданием ее упрощенных моделей, представленных на «машинном» языке. Как педагогический прием — для облегчения понимания простейших действий человека, алгоритмируемых имеющимися средствами, такой подход себя во многих случаях оправдал. Однако в творческом плане — для раскрытия механизмов сложных видов оперативной деятельности и использования таких данных при построении информационных и управляющих вычислительных машин — возможности такого подхода оказались принципиально ограниченными. О. К. Тихомиров [117] объясняет это прежде всего большим различием в уровнях сложности технических моделей «поведения» ЭВМ и психологических моделей деятельности человека.

Нам представляется, что необходимо обратить внимание еще на одно существенное обстоятельство: машинного «мышления» и «поведения» как такового не существует. Машинная программа — это материализованная схема мышления математика-программиста, структура которого жестко ограничена возможностями ЭВМ и связана со спецификой ее функциони-

рования. Это как бы игра по особым, очень жестким правилам. Перенос схемы деятельности программиста на иные, в том числе операторские, виды деятельности, характеризующиеся другими функциями и техническими ограничениями (правилами «игры»), без глубокого сопоставительного анализа их структур неправомерен. Таким образом, многие исследователи изучали не «поведение» ЭВМ, а машинную модель структуры мышления программистов, удобную своей простотой и определенностью. Именно эта детерминированность модели мышления привела к тому, что взгляды исследователей, слишком прямо переносивших знания о функционировании ЭВМ на человека-оператора, удивительно совпали по своей структуре с механистическими концепциями представителей реактологии и рефлексологии.

Естественно, что попытки использовать языки программирования для описания поведения операторов более сложных систем были успешны только в той весьма ограниченной части функций операторов, которая совпадала по своей структуре с задачами программирования как цепь определенных реакций на исходные данные и промежуточные результаты («сигналы»).

В качестве примера можно сослаться на проблемно-ориентированные языки для описания действий оператора «ЯЗОН» А. Г. Чачко [122] и «АЛМЭС» В. А. Шарова [123]. Например, В. А. Шаров в своей работе ограничился такими операциями, как «найти, прочесть, вспомнить, запомнить, записать, нажать кнопку, повернуть ключ». Столь неполное представление о функциях операторов, игнорирование сложных сенсорных и мыслительных процессов приводит автора к слишком оптимистичному выводу о том, что «формализация алгоритмов с использованием языка, близкого к языкам программирования для ЭВМ, позволяет в некоторых случаях свести задачу построения рациональной системы оператор—машина к задаче оптимизации алгоритмов и программ по заданным критериям и применить для ее решения известные процедуры оптимизации» [123, стр. 64]. Однако ощутимых практических результатов на этом пути пока не получено. Сейчас проблема состоит еще не в том, чтобы найти подходящую форму представления модели деятельности оператора, а в том, чтобы изучить структуру этой деятельности, т. е. узнать основное строение и существенное содержание объекта моделирования — деятельности человека, включая ее сложные сенсорные и мыслительные компоненты.

Подобные языки могут и должны развиваться параллельно с решением этой проблемы, по мере накопления содержательных данных о структуре деятельности операторов, облегчая одновременно систематизацию и формализацию получаемых фактических данных, первичность которых по отношению к языку бесспорна. Совместное применение методов психологии и кибернетики уже дало на этом пути некоторые результаты. Например, метод представления мышления в виде элементарных

операций широко используется в работах В. Н. Пушкина, А. В. Напалкова, Г. М. Зараковского, Н. М. Амосова, Ньюэлла, Саймона и др. По поводу перспектив моделирования мышления В. М. Глушков писал [44, стр. 110]: «Вопрос о возможности моделирования мыслительных процессов переносится в чисто гносеологическую сферу и сводится к вопросу о возможности познания закономерностей мыслительных процессов».

Л. М. Веккер [10, стр. 63] ставит чрезвычайно важный для гносеологии вопрос: «либо переводимость психологических понятий на язык информационных процессов и возможность моделирования психологических характеристик процессов, либо признание второй субстанции, стоящей за психической деятельностью человека, т. е. «души» в традиционно идеалистическом смысле этого понятия. Здесь информационные процессы, очевидно, понимаются не в узком, шенноновском смысле, а в широком смысле процессов передачи и переработки информации, которые могут быть выражены, смоделированы в явной форме, например, посредством пусть очень сложных алгоритмов. О. К. Тихомиров, возражающий против остроты этой альтернативы Л. М. Веккера, сам дает хороший материал в пользу возможности моделирования (пока весьма упрощенного) мыслительных процессов, детально изучив и представив в формализованном виде (в частности, с помощью древовидных структур хода решений) примеры мыслительной деятельности шахматистов.

Перечисляя пункты, по которым отличается мышление человека от работы вычислительных машин, О. К. Тихомиров почти в каждом из них упоминает как неформализуемое понятие субъективного смысла (ситуации, попыток, переобследования и т. д.). В некоторых случаях это понятие, на наш взгляд, может быть заменено измеримой величиной — субъективным распределением вероятностей (элементов ситуации, их «стоимостей», успеха вариантов решения и т. д.). При экспериментальном исследовании процессов решения оперативных задач мы наблюдали, как у испытуемых по мере накопления знаний о физико-технологической структуре объекта направленно изменялось представление о «смысле» различных элементов ситуаций, нивелируясь между отдельными испытуемыми и приближаясь к единому объективному, детерминированному природой самого объекта, значению этих элементов по мере накопления опыта работы с информационной моделью, овладения способами ее расшифровки и дополнения при решении одной или серии оперативных задач. Если при этом вводилась новая задача, сенсорно и концептуально не полностью определенная, в отношении элементов этой новой ситуации вновь наблюдалось разнообразие субъективных представлений об их «смысле».

Очевидно, что наряду с констатацией различий между субъективным операциональным смыслом объекта и его реальным значением необходимо указать на роль информационно-поиско-

вых и исследовательских действий, направленных на уменьшение этих различий. Это особенно четко проявляется в операторской деятельности при неполном визуальном отображении состояния объекта, когда в условиях значительной неопределенности человек-оператор способен так синтезировать неполные и фрагментарные сведения о ситуации, что получаемые субъективные априорные распределения вероятностей нередко поразительно сходны с апостериорными. В этом контексте изучение своеобразия человеческого мышления по сравнению с работой вычислительной машины, несомненно, актуально не только для рационализации деятельности человека с информационными моделями, но и для рационализации вычислительных машин и их языков.

При всех обстоятельствах необходимо учитывать главнейшую отличительную черту мышления человека, вытекающую из общественно исторической обусловленности развития психики человека, доказанной в основополагающих трудах Л. С. Выготского, А. Н. Леонтьева, П. Я. Гальперина, С. Л. Рубинштейна и др.

Изучение мышления как особого вида познавательной деятельности имеет значительную историю, которая весьма обстоятельно проанализирована в работе О. К. Тихомирова [117].

Мы отметим лишь два экспериментальных направления, получивших наименования школы «гештальтпсихологии» и «бихевиоризма».

Большая заслуга гештальтпсихологов состоит в том, что они разработали ряд новых экспериментальных методов изучения мышления, в том числе дифференциацию задач по сложности и типам, «думание вслух», метод «подсказок» и др. Вместе с тем философская позиция гештальтпсихологов, как отмечает А. Н. Леонтьев, совпадает в основном с идеалистическим интуитивизмом. Критический анализ работ гештальтпсихологов дан также Л. С. Выготским, П. Я. Гальпериным, С. Л. Рубинштейном, Пиаже, Хеббом, Гибсоном.

Большой объем экспериментальных исследований, слабо объединенных общей теорией и потому весьма разрозненных и фрагментарных, был проведен в рамках школы «бихевиоризма». Особенно широкое распространение получил здесь метод «проб и ошибок» Торндайка.

Бихевиористская психология не оправдала выданных векселей прежде всего потому, что, объявив о возможности сконструировать поведение в целом из отдельных элементарных отношений и накопив огромный экспериментальный материал об отношениях стимул—реакция, она не сказала, как это сделать. В известном смысле бихевиоризм был шагом назад по сравнению с гештальтпсихологией. Взятая бихевиористами за основу в своих опытах аналогия с физикой, имеющей в экспериментах дело с чистыми веществами, не подтвердилась, ибо различия в реакциях даже одного и того же испытуемого,

помещаемого в каждом опыте в одну и ту же строго изолированную обстановку, настолько превышают различия между молекулами вещества, что возлагать надежды на фундаментальность простых статистических закономерностей, без проникновения в структуру связей, видимо, нет смысла.

По выражению М. Тода и Э. Шуфорда [119], существование правил системной связи или, иначе говоря, структуры ситуаций — единственное, что дает возможность объяснить сложное явление, пользуясь отношениями, которые на одну ступень более элементарны. Структура — это почти синоним потери степеней свободы. Законы гештальта в области психологии восприятия — один из примеров структур.

Научная стратегия, чаще всего приводившая до сих пор к успеху, — это выявление исходного множества микроотношений и затем уже конструирование на их основе макроскопических, более сложных отношений.

Но вероятно, это не единственная из принципиально возможных стратегий. По мнению упомянутых выше авторов [119], некоторые причины заставляют сомневаться, может ли исключительное применение такого подхода в науках о системах и о поведении привести к успехам, сравнимым с успехами в физических науках. Сомнение основывается на том, что науки о поведении имеют дело с существенно более сложными структурами, чем физические науки.

В психологии, как и в физике, в настоящее время признана недостаточность поиска частных статистических связей. Построение единой обобщающей теории, единого взгляда на колоссальное количество разрозненных экспериментальных фактов является общей проблемой многих современных наук, связанных с изучением разного рода систем, характеризующихся сложной структурой, поведением, развитием, приспособлением и т. п. Типичность этой проблемы для многих наук, по-видимому, и послужила толчком к созданию общей теории систем.

Весьма существенный шаг в современной психологии — это рассмотрение, наряду с единичными отношениями стимул—реакция, структуры их соединения в более сложных актах поведения. Переход к структуре резко снижает число возможных сочетаний единичных актов, факторов, обусловливающих деятельность человека, экспериментов, необходимых для набора необходимых статистических данных.

В настоящее время применительно к деятельности операторов не известен (а быть может и принципиально невозможно найти) чисто формальный метод составления структуры деятельности и на этой основе — перехода к относительно небольшому (обозримому практически [1]) числу факторов, существенно

[1] Практически обозримое число факторов — это число факторов, все основные сочетания которых могут быть рассмотрены при имеющихся реальных возможностях (по времени, вычислительным средствам и т. п.).

влияющих на изучаемую деятельность. Отсюда следует, что в каждом случае изучение нового вида деятельности человека-оператора должно включать содержательный, качественный, анализ функционирования системы «человек—машина», в ходе которого должны широко использоваться данные наблюдений за реальной деятельностью и экспериментов, направленных на выявление и исследование особенностей («особых точек») в форме зависимости протекания деятельности от изменения основных факторов.

В отличие от многих зарубежных школ, надолго оторванных бихевиоризмом от теоретического обобщения знаний о поведении человека как о целостном сложном явлении, советская психологическая школа значительно продвинулась в этом направлении в первую очередь благодаря трудам Л. С. Выготского, А. Н. Леонтьева, С. Л. Рубинштейна, А. В. Запорожца, П. Я. Гальперина, Б. Г. Ананьева, Б. Ф. Ломова и др.

В противовес представителям, например, Вюрцбургской и натуралистической школ, придерживавшимся крайних позиций по вопросу соотношения мышления и внешних действий, советская психологическая школа рассматривает соотношение между внешней и внутренней деятельностью человека во всей его сложности, на разных уровнях — деятельность, действия, операции. Основываясь на исследованиях процессов развития психики, А. Н. Леонтьев указывает на центральное значение понятия «отражение» в исследованиях мышления. Отсюда следует важность психологического изучения многообразия форм отражения ситуации, в том числе специфических его форм при опосредствованном восприятии состояния сложных управляемых систем и решении оперативных задач. Чрезвычайная сложность проблемы изучения структуры мыслительной деятельности операторов диктует необходимость использования в психологических исследованиях широкого набора методов и средств.

Широкое распространение в психологии мышления получил метод, основанный на описании конкретных процессов творческого мышления, в том числе на основе самонаблюдения крупных ученых (Гельмгольц, Пуанкаре, Гильберт, Адамар и др.).

На основе подобного метода исследования процессов мышления Д. Пойа были разработаны метод «подсказок» и правила решения эвристических задач ступенчатым регрессивным рассуждением. Допускается, что задача уже решена, затем смотрят, из какой посылки это вытекает, и так шаг за шагом от конца к началу, пока не будет найдена очевидная исходная посылка. Обратное этому прогрессивное рассуждение ведется от начала ступенями к искомому решению.



Делались попытки представить методы решения эвристических задач в более строгом, формализованном виде. О. Ф. Серебрянников [107] доказал, что уровень формализации

эвристических принципов, достигаемый в натуральных исчислениях, вообще говоря, недостаточен, чтобы придать поиску решения вполне организованный, регулярный характер. Однако секвенциальные исчисления, разрабатываемые в русле эвристического программирования машин, не ставят своей целью отображение реального хода человеческого творческого мышления, они обеспечивают нахождение в известном смысле прямого пути решения проблемной логической задачи, исключая более типичные «окольные пути».

Важное значение для исследования мыслительной деятельности операторов имеют выводы С. Л. Рубинштейна и Б. М. Теплова [115] относительно психологического содержания практического мышления человека, его сходства и отличий от теоретического мышления. Изучая психологическую структуру деятельности полководцев, Б. М. Теплов отмечал следующие характерные черты практического мышления: решение должно быть положительным и наилучшим в данных конкретных условиях (в теоретической науке ценны и отрицательные результаты), решение должно быть конкретным: на основании анализа сложного материала с обязательным выделением существенного необходимо синтезировать решение, дающее простые и определенные положения; решение жестко ограничено во времени. Учитывая многообразие проявлений и форм мыслительной деятельности, С. Л. Рубинштейн рассматривал мышление как деятельность (с акцентом на мотивационно-личностный план) и как процесс (с характерными компонентами — анализом, синтезом и обобщением). Рассмотрение продуктивного мышления как процесса позволило выделить его основные этапы: 1) осознание проблемности: если прошлый опыт не помогает, необходимо искать новые пути; 2) поиск новых путей; 3) проверка решения и включение его в мотивационно-личностный план.

Влияние деятельности субъекта, конкретных задач, стоящих перед ним, на процессы восприятия, а также общность между восприятием и действиями человека, состоящая в их целеустремленности и предметности, выявлены и всесторонне изучены А. Н. Леонтьевым, Б. Г. Ананьевым, Б. М. Тепловым, Д. Н. Узнадзе, Б. Ф. Ломовым, А. В. Запорожцем, В. П. Зинченко и др.

На большом экспериментальном материале Тэннер, Светс и Бедсалл [75] показали, что наблюдатель соотносит свои сенсорные данные с поставленной перед ним целью и теми сведениями, которые он получил о воспринимаемом объекте предварительно, причем полученные авторами количественные данные весьма точно совпадают с моделями статистической теории решений. Наиболее строгое экспериментальное и теоретическое доказательство сложных вероятностных процессов, включенных в восприятие, дано в работах Е. Н. Соколова [110] и В. Д. Глезера [43].

Основатель советской школы инженерной психологии Б. Ф. Ломов [76] разделяет все действия оператора в процессе управления на три основные группы: 1) рабочие (исполнительные), посредством которых осуществляется воздействие на объект; 2) гностические, которые направлены на познание объекта; 3) приспособительные, целью которых является приведение объекта в требуемое состояние. Рационализация деятельности операторов должна касаться всех этих видов действий. Однако, учитывая специфику различных действий, в исследованиях принято условно отделять первую группу, чаще всего связанную с реализацией решений, от двух последующих, с помощью которых решение формируется.

Основным средством поиска и формирования решения для человека-оператора является психическая модель объекта, которая охватывает все знания, касающиеся управляемого объекта, накопленные оператором к моменту возникновения очередной задачи. При ее решении часть знаний актуализируется, составляя вместе с вновь полученными данными особую, оперативно-психическую модель, остальные знания составляют в этом случае латентную часть психической модели объекта. Успех решения во многом зависит от адекватности оперативно-психической модели реальному состоянию объекта и возникшей задаче.

В последнее время наблюдается повышенный интерес к исследованиям образных компонентов в мышлении. Интенсификация исследований процессов образного мышления на Западе явилась логическим следствием несостоятельности бихевиоризма и близких ему физиологических теорий обусловливания в объяснении сложных форм поведения и психической деятельности. Изучению образных явлений в мышлении не помешало, казалось, всеобщее увлечение, особенно в США, всевозможными моделями процессов опознания, памяти, решения и др. Модели, построенные на основе примитивных бихевиористских представлений, отражали узость теоретических конструкций бихевиоризма. Естественно, что такие модели оказывались ухудшенными вариантами машинных программ решения всевозможных комбинаторных задач, так что в результате анализа таких моделей почти всегда следовал вывод, что машина легко может воспроизвести практически любой вид деятельности человека. Вывод резко противоречил практике: операторы удивительным образом решали задачи, манипулируя целостными образами реальности, не поддающимися переводу на известные машинные языки.

Контакт с реальностью в виде объекта или чаще — его информационной модели представляет собой важнейшее условие деятельности оператора в процессе принятия решений. В отличие от решения задач на машине, когда крайне ограничены возможности корректировки программы решения посредством соотнесения отображения с реальностью, человек,

манипулирующий обобщенным отображением, может при необходимости обращаться к конкретной реальности или образам объектов.

На эту способность человека преобразовывать абстрактные оперативные единицы восприятия и памяти в более конкретные и детальные образы и на особую роль зрительной системы в подобных процессах, в том числе при решении проблемных творческих задач, указывали многие психологи. О. Зельц в качестве важного этапа решения задач вводил процесс визуализации проблемной ситуации или проблемного комплекса. Макс Вертгеймер, подробно описавший процесс своего решения геометрической проблемы, указывал, что новая идея появилась у него не как некое вербальное утверждение, а как проникновение взглядом в структуру проблемы, природу ее внутренних связей, путем визуализации сложных пространственных образов, мысленного объединения и сопоставления их [58].

Один из основателей области исследований, названной им «визуальным мышлением», Р. Арнхейм [126] писал: «Мышление зарождается в перцептивной сфере, и мы начинаем подозревать, что многие истинно творческие проявления ума в любой области и на любом уровне заключаются в перцептивных операциях». А. Эйнштейн в своем письме Ж. Адамару [2] сообщал свое мнение о наглядно-образном мышлении: «Психические сущности, которые, вероятно, служат элементами мысли, — это определенные знаки и более или менее ясные образы, которые можно «произвольно» воспроизводить и комбинировать между собой».

Образное мышление, по-видимому, превалирует над словесно-логическим в тех случаях, когда трансляция зрительных сообщений или условий задачи со всеми их необходимыми подробностями и деталями в речевую форму слишком громоздка или вообще невозможна, причем обобщение результатов не требуется — задача носит сугубо конкретный характер. Это относится в первую очередь к оперированию сложными образами — фигурами и объемными формами, цветовыми композициями и т. п.

Высокая развитость образных форм мышления у человека имеет глубокую филогенетическую основу. На основе анализа работ многих авторов Л. С. Выготский сделал вывод о том, что мы имеем совершенно ясное доказательство того, что зачатки интеллекта, т. е. мышления в собственном смысле слова, появляются у животных независимо от развития речи и вовсе не в связи с ее успехами. «Изобретения» обезьян, выражающиеся в изготовлении и употреблении орудий и в применении «обходных путей» при разрешении задач, составляют совершенно несомненно первичную фазу в развитии мышления, но фазу доречевую [38].

Если провести аналогию с процессом образования понятий, который глубоко и всесторонне исследовался Л. С. Выготским,

то можно предположить, что процесс формирования образа также носит всегда продуктивный, а не репродуктивный характер. Образ возникает и формируется в процессе сложной операции, направленной на решение какой-либо задачи, и одного лишь наличия внешних условий и механического установления связи между образом и воспринимаемыми объектами недостаточно для его возникновения.

Таким образом, необходимо, чтобы перед испытуемым возникла задача, которая не может быть решена иначе, как с помощью формирования образа, для того чтобы возник и этот процесс.

Задачей образного, «визуального», мышления является достижение ясности путем целенаправленного упорядочения условий задачи. В ходе такого мыслительного процесса запутанная ситуация с неопределенными отношениями между ее деталями структурно перестраивается, организуется и упрощается, пока «наградой разуму за его труд не станет образ, который делает значение видимым» [127].

Таким образом, наряду со словесно-логическими конструкциями и схемами мышления при исследовании процессов решения задач существенны также умственные и перцептивные действия, связанные с визуализацией, порождением и преобразованием образов. Эти вопросы интенсивно исследуются в последние годы в советской и зарубежной психологии. В. П. Зинченко выдвинул гипотезу о фазовой структуре визуального мышления [58]. Первая фаза — внешне выраженные действия большой амплитуды. Вторая — фаза «отстройки» наблюдателя от ситуации, сопровождающаяся дрейфовыми движениями глаз, совпадающими с мысленным представлением или визуализацией элементов проблемной ситуации. На третьей фазе осуществляется манипулирование образом или моделью ситуации, направленное на целесообразное и адекватное задаче преобразование структуры этого образа. Эта фаза характеризуется внешне микродвижениями глаз. Завершается этот цикл формулированием, проверкой и реализацией решения. В нашей работе сделана попытка выявить фазы глазодвигательного поведения на экспериментальном материале, связанном с решением реальных оперативных задач (до сих пор исследования В. П. Зинченко, В. Н. Пушкина и других психологов велись на весьма приближенных моделях деятельности операторов — шахматах и игры в «5»).

В ходе таких исследований необходимо учитывать индивидуальные различия между людьми по преобладанию у них разных форм мышления, что должно, видимо, сказываться и на структуре деятельности с информационными моделями.

Крупный математик и талантливый психолог Ж. Адамар [2] на многочисленных примерах показал, что существуют как люди с ярко выраженным словесно-логическим мышлением, зачастую вообще не оперирующие никакими образами

(например, известный физиолог М. Мюллер), так и люди, в механизме мышления которых, по высказыванию А. Эйнштейна о себе, «слова, написанные или произнесенные, не играют, видимо, ни малейшей роли».

Представление об этих двух различных типах мышления помогло нам истолковать результаты опыта, который был проведен нами с операторами ТЭЦ в 1963 г. Щит управления этой станции был укомплектован стрелочными измерительными приборами и текстовым табло аварийно-предупредительной сигнализации. Ряд операторов часто допускали ошибки при определении причин сложных нарушений режима, когда требовалось проследить технологические связи. Стремясь доказать преимущества отображения информации о состоянии сложного блока в графической форме, мы дополнительно к приборам отобразили блок в виде мнемосхемы и провели опыты по решению наиболее сложных задач с этой группой «отстающих» операторов. Результаты оказались превосходными: у большинства из этих операторов сократилось время решения задач, практически исчезли ошибки при анализе структуры объекта, появилась уверенность в действиях. Однако попытка доказать преимущество мнемосхемы и в опытах с другими («передовыми») операторами особого успеха не имела: показатели их работы улучшились значительно меньше, причем в экспериментах многие из них редко пользовались мнемосхемой. Большей привычкой второй группы к приборному щиту эти результаты объяснить нельзя — средний стаж работы с этим щитом у операторов первой и второй групп был примерно одинаков. «Запас недостатков» в их работе был достаточен, до «насыщения» уровня обучения было еще далеко, так что показатели могли еще улучшаться (кстати, это в дальнейшем произошло, когда изменили компоновку приборов на щите и дополнительно ввели избирательную систему контроля). Два оператора, слабо работавшие по приборному щиту и значительно меньше других повысившие показатели решения задач по мнемосхеме, как оказалось, были новичками, и их показатели в расчет приняты не были. В основной группе одна часть операторов имела преимущественно образный тип мышления, другая — словесно-логический. Таким образом, при оценке средств отображения информации необходимо учитывать различия в индивидуальных типах мышления операторов и испытуемых. С другой стороны, на практике возможен неверный вывод о низкой квалификации оператора, в то время как на самом деле способ отображения не соответствует типу его мышления. Как показали в своих исследованиях А. В. Запорожец, А. Н. Леонтьев, Б. Ф. Ломов, В. П. Зинченко, Н. Ю. Вергилес, Ж. Пиаже и другие, образы имеют различную структуру в зависимости от состава перцептивных и познавательных действий, а также оперативных единиц восприятия и памяти, которыми владеет субъект. Например, Ж. Пиаже указывал, что образ зависит

от того, по каким схемам воспроизводится ситуация: дооператорным или операторным, а также от уровня интеллекта индивидуума. Преимущество визуализированного образа состоит в субъективной симультанности и широте охвата ситуации, отображенной в зрительном образе.

Таким образом, проблема наглядно-образного, или визуального, мышления занимает видное место в исследовании структуры мыслительной деятельности при решении оператором сложных задач. Основу решения этой проблемы составляют фундаментальные психологические исследования высших психических функций — восприятия, памяти, мышления (образного и понятийного), а также психологических инструментов деятельности: профессионального опыта, знаний, программ и схем поведения, навыков оператора и т. п. С точки зрения приложения результатов исследований к практике проектирования автоматизированных систем управления актуальное значение имеет разработка методов согласования оперативно-психической и оперативно-информационной моделей управляемых объектов.

Нами была поставлена задача поиска статистических связей между объективными факторами сложности оперативных задач, решаемых по мнемосхеме, и характеристиками глазодвигательного поведения испытуемых, в том числе в разных фазах решения [58], а также общими результатами (эффективностью) решения: временем решения и числом ошибок. Самостоятельное значение имеет подобный анализ при использовании в экспериментах разных типов и вариантов средств отображения информации. В этом случае характеристики глазодвигательного поведения и эффективность решения использовались нами как критерии сравнительной оценки средств отображения информации. Данные таких исследований позволили сформулировать ряд принципов построения графических средств отображения, направленных на оптимизацию структуры сенсорной и мыслительной деятельности операторов, связанной с принятием решений. Дополнительно была поставлена задача исследования и разработки отдельных мнемосимволов — способа кодирования элементов объектов (параметров, органов управления и т. п.), обеспечивающего их наиболее эффективное кодирование, облегчающего опознание первичных информационных деталей ситуаций.

Наряду с деятельностью, связанной с принятием решений, в современных системах управления широко распространена деятельность, связанная со слежением, регулированием параметров. Несмотря на относительную простоту деятельности при слежении, исследование этого вида функций операторов представляет значительную сложность прежде всего из-за несравненно большего диапазона внешних условий, при которых протекает этот вид деятельности, более высоких требований к точности воспроизведения в эксперименте динамических

свойств управляемых объектов, обусловливающих структуру сенсомоторных реакций человека.

Исследования деятельности операторов в режиме слежения обычно направлены главным образом на создание математических моделей поведения человека как звена в контуре регулирования с целью изучения его способности приспосабливаться к изменяющимся входным сигналам в разных диапазонах их частот. Чаще всего создавались аналоговые квазилинейные (линейные в определенных интервалах) модели процессов слежения оператором входных сигналов гауссова типа низкой частоты (0—6 рад/с). Обзор этих исследований дан нами в [21].

В зависимости от реальных условий, в которых приходится работать оператору, его функции могут сводиться кроме слежения также к предсказанию или компенсации. Поясним это на примере оператора энергетического блока.

При работе энергоблока вид входной функции определяется диспетчерским графиком (плановое изменение режимов) и непредвиденными возмущениями. Если нагрузка блока определяется графиком и возмущения отсутствуют, то можно с уверенностью предсказать действия по управлению блоком на значительное время вперед, что по существу аналогично системе управления с разомкнутой цепью обратной связи. В случае, если график нагрузки быстропеременный, оператор может предсказать действия только на небольшой период и должен очень внимательно следить за информацией, представляемой на СОИ. Эти условия работы оператора наиболее соответствуют слежению. Функции компенсации выполняются оператором в том случае, если непрерывно следуют возмущения (нестабильная работа питания, переменная калорийность топлива и т. п.). При этом оператор вынужден постоянно следить за показаниями приборов и компенсировать возмущения.

Следует отметить, что в реальных условиях трудно провести четкую границу между указанными тремя типами регулировочных действий оператора; как правило, все они входят в виде компонентов в его деятельность с различным удельным весом в соответствии с конкретными условиями. Причем процессы перехода человека-оператора от одного вида действий к другому и приспособления к быстро меняющемуся виду входной возмущающей функции часто настолько сложны, что их модели в настоящее время неосуществимы технически. Однако даже в упрощенном виде модель помогает изучать процесс обучения действиям в системе регулирования и, что особенно важно, определять при конструировании СОИ и системы управления в целом наиболее вероятные действия человека при различных видах возмущающей функции.

Аналоговые модели применяются при проектировании систем управления с участием человека-оператора в следующих целях: для вычисления передаточной функции системы «человек—машина», когда возмущающая функция, действующая на вход системы, и динамика регулируемого объекта известны; для определения динамики трудно управляемых систем и границ управляемости; для нахождения максимальной полосы частот возмущающей функции, при которой человек еще может осуществлять управление; для указания типа управления дополнительной системы (индикатора или модификаций регулируемого элемента), необходимой для того, чтобы свести к минимуму требования к оператору при ручном управлении; для определения наиболее представительных параметров при выборе обратной связи; для описания наиболее важных свойств динамики машины с точки зрения качества ручного регулирования.

Однако по сути эти задачи могут решаться с помощью аналоговых моделей лишь для непрерывных низкочастотных процессов. Учитывая эти существенные ограничения, а также упоминавшиеся ранее недостатки аналоговых моделей, предпринимались попытки построить модели других типов: дискретные, импульсные и др. [21].

Анализ этих работ показывает, что в некоторых частных случаях поведение человека как звена в системе управления может быть достаточно точно описано с помощью простых математических средств, обычно применяемых для описания свойств объектов регулирования и автоматических управляю-

щих устройств. Однако вместе с тем следует отметить некоторые недостатки и ограничения в обсуждавшихся исследованиях:

1. При разработке моделей поведения оператора в качестве регулируемых объектов применялись элементарные динамические звенья. Использование здесь моделей сложных реальных управляемых объектов существенно повысило бы их практическую ценность. Влияние динамических свойств регулируемого объекта на поведение человека-оператора отчетливо выявилось в экспериментах, направленных на выбор характеристик контрольно-измерительных приборов. В качестве регулируемых объектов нами использовались апериодические звенья первого—пятого порядков, а также модели реальных теплоэнергетических объектов, описываемых системами дифференциальных уравнений седьмого—девятого порядков (см. гл. 4).

2. Большинство моделей поведения человека-оператора являются квазилинейными. Они описывают поведение достаточно точно лишь в ограниченных интервалах изменений условий работы системы управления и ее характеристик. Это обстоятельство сильно затрудняет применение их в исследованиях работы оператора на реальных объектах, где функции оператора, характеристики входных сигналов, динамические свойства отдельных регулируемых каналов, а также внешние условия работы изменяются в широких пределах.

3. Модели не отражают зависимости структуры поведения человека-оператора от способа подачи информации, в частности от структуры СОИ и характеристик его элементов, темпа поступления сигналов, оперативного объема восприятия.

В целом практическая задача моделирования заключается в отражении поведения человека-оператора при выполнении заданных функций в реальной системе с известными эксплуатационными, в том числе динамическими, характеристиками и конкретным СОИ.

Специфика проведенного нами исследования деятельности операторов при слежении состоит в комплексном учете таких факторов, как интенсивность потока поступающих к оператору сигналов, число одновременно воспринимаемых им отклонений параметров, а также внешние условия деятельности (освещение, шум, конструкция рабочего места оператора).

Среди многочисленных функций операторов современных промышленных АСУ одними из наиболее типичных являются функции принятия решений при возникновении нарушений режима и слежения (регулирования) технологических параметров. В данной работе исследуется деятельность операторов при выполнении этих двух видов функций, при этом основное внимание уделяется выявлению факторов, обусловливающих сложность решения конкретных типов оперативных задач, и поиску методов компенсации влияния этих факторов путем выбора структуры отображения информации об управляемом объекте, адекватной структуре его оперативно-психической модели.

В качестве средств отображения информации при изучении процессов принятия решения в экспериментах использовались преимущественно мнемосхемы — графические информационные модели, условно отображающие постоянную технологическую или функционально-оперативную схему управляемого объекта. Мнемосхемы нашли широкое распространение на пунктах управления энергетическими объектами и системами, в химии, металлургии и в других отраслях промышленности и транспорта.

Мнемосхемы представляют собой весьма удобный экспериментальный материал для исследования комплекса вопросов, связанных с методами отображения информации в АСУ. Их преимущества заключаются в следующем:

1. Мнемосхемы — это многокомпонентные средства отображения, включающие в себя в разных вариантах самые разнообразные элементы: графические схемы, световые сигнализаторы, буквенные и цифровые обозначения и др. и легко сочетаемые с другими типами СОИ; стрелочными и цифровыми приборами, телевизионными индикаторами, ЭЛТ и т. п.

2. В лабораторных условиях могут варьироваться многие характеристики мнемосхем: размеры, компоновка и графическое построение, начертание букв, цифр, мнемосимволов, расстояние до оператора.

3. Весьма разнообразны технические методы реализации мнемосхем: постоянный рисунок или аппликации на плоскости, проекция на большой экран или на экран телевизионного приемника, с помощью знакогенерирующих ЭЛТ, электролюминесцентных элементов и т. д.

Наиболее простые и дешевые рисованные мнемосхемы (в том числе отображаемые посредством диапроекции) позволяют воспроизводить и исследовать в лаборатории психофизические характеристики не только большинства существующих технических средств графического отображения информации, но и имитировать с хорошим приближением многие перспективные средства и таким образом заблаговременно разрабатывать инженерно-психологические требования к ним. Эксперименты с мнемосхемами позволили отработать принципы комбинированного графического и буквенно-цифрового отображения оперативной информации в компактной форме, которые были использованы в дальнейшем при проектировании справочных и графических «дисплеев» (знакогенерирующих ЭЛТ) и разработке алгоритмов вывода данных на их экраны. Недостатки в зрительной дифференцировке графической информации на экранах черно-белых «дисплеев» по сравнению с мнемосхемами стимулируют разработку и внедрение более приближенных к мнемосхемам по качеству отображения многоцветных ЭЛТ и телевизионных приемников для систем оперативного управления.

Работы многих психологов показывают, что использование в экспериментах реальной существующей аппаратуры отображения, например семисегментных цифровых индикаторов, серийных электролюминесцентных индикаторов и мнемосхем [59], хоть и позволяет более строго оценивать условия работы оператора с конкретными типами СОИ, в то же время сужает область применимости выводов экспериментов (особенно по их долговечности) и часто фиксирует внимание исследователей на конструктивных недостатках этих СОИ, препятствуя более широкому изучению самой структуры деятельности оператора и разработке на этой основе наиболее оптимальных вариантов СОИ.

2 Функции человека-оператора в АСУ технологических производств и общие психологические требования к средствам представления информации

Проведенный выше обзор методов психологических исследований деятельности операторов с информационными моделями показал, что общей теории такой деятельности пока нет. В связи с этим возникает необходимость в анализе конкретных функций операторов автоматизированных систем управления и создании их рабочих классификаций для выбора наиболее типичных и представительных с точки зрения экспериментального психологического исследования структуры информационных моделей.

В зависимости от применяемых средств автоматизации — одного из основных факторов, определяющих специфику функций и структуру деятельности оператора, все системы оперативного управления подразделяются на шесть основных типов, которые в принципе соответствуют этапам исторического развития систем управления:

1. Децентрализованные системы, в которых управление объектами и агрегатами производится людьми, находящимися в непосредственной близости от них. Операторов в строгом смысле слова в этих системах нет.

2. Централизованные системы, в которых управление осуществляется человеком дистанционно, но круг его функций (пуск агрегатов, регулирование их параметров, смена и переключение режимов) остается тем же, что и в предыдущем типе систем. Такие системы подразделяются также на комплексно механизированные, телемеханизированные и т. п. Удаленность от объекта существенно меняет специфику труда человека, его деятельность в этих системах относится уже к операторским профессиям.

3. Централизованные системы, в которых поддержание заданного значения (стабилизация) параметров осуществляется автоматически, например с помощью аналоговых электронных регуляторов. В условиях нормальной эксплуатации оператору в таких системах почти не приходится заниматься ручным дистанционным регулированием. С помощью автономных средств могут быть автоматизированы также некоторые функции управления (т. е. дискретного воздействия на технологический режим), такие как пуск отдельных агрегатов, их аварийная защита. Эти системы отличаются, как правило, более высокой степенью централизации управления — один оператор управляет бо́льшим объемом технологического оборудования, чем в системах предыдущего типа.

4. Централизованные системы, в которых применяются информационные вычислительные машины. В этих системах более рационально организована подача оператору информации о состоянии объектов и результатах его собственных воздействий на них.

5. Централизованные системы, в которых применяются вычислительные машины-советчики. Машины выдают не только информацию о состоянии объекта, характере изменений в его работе, но и рекомендации о возможных способах оптимизации режимов, устранения их опасных нарушений.

6. Централизованные системы, в которых применяются управляющие вычислительные машины (УВМ), осуществляющие все функции контроля, регулирования, управления, определения эффективности работы объекта.

Оператор выполняет в основном контрольные функции, вступая в действие лишь в случае сбоев в работе УВМ, при возникновении непредвиденных ситуаций или при вводе команд в машину.

Управление автоматизированной системой связано с решением таких задач, как выработка оптимального плана, определение функций подсистем, оценка возможного и оптимального сроков достижения общей цели системы, контроль за реализацией плана и его корректировка по ходу выполнения, разработка рекомендаций по маневрированию энергетическими и технологическими ресурсами. Одна из основных задач оператора состоит в выборе и вводе в автоматические управляющие устройства тех данных об окружающих условиях (в самом широком смысле), которые наиболее важны в этот момент, а также установлении критерия оценки общей эффективности с точки зрения достижения поставленных задач.

Как известно, автоматизация управления производством порождает множество проблем. Одна из основных проблем связана с организацией гармонического взаимодействия человека с автоматическими устройствами, распределением функций между этими компонентами больших систем.

У. Г. Синглтон [148] пришел к отрицанию проблемы распределения функций, исходя из того, что «. . .действительная задача проектирования состоит не в том, чтобы распределять функции между человеком и машиной, а в том, чтобы перепоручать машине функции человека». Ошибочность такого подхода состоит в том, что в этом случае с помощью средств автоматизации от оператора в первую очередь отторгаются наиболее простые функции, которые зачастую, не требуя от него высокой сосредоточенности и напряжения, позволяют ему постоянно находиться в курсе изменения технологических процессов, корректировать свои знания об объекте, его оперативно-психическую модель, поддерживать определенный тонус сенсомоторных механизмов, прогнозировать возможные серьезные нарушения и готовиться к их устранению. Легко представить, к чему привела бы автоматизация вождения автомобиля в соответствии с подходом Синглтона: на свободных участках дороги управлял бы автомат, а водитель должен был бы принимать экстренные меры, если например, в 15—20 м перед автомобилем неожиданно возникало препятствие. Известно немало случаев, когда АСУ, построенные по подобному принципу, вместо облегчения сильно усложняли деятельность операторов, а иногда оказывались совершенно не работоспособными. Возможно, следствием именно такого подхода явилось то, что, по свидетельству английского социолога Кларка, нервнопсихические заболевания операторов, выходящих из строя уже к 40—45 годам, стали в Англии поистине национальным бедствием.

Очевидно, необходимо четко различать полную автоматизацию управления объектом — замену человека автоматом и

частичную автоматизацию — передачу машине (автомату) части функций человека, который в этом случае из системы не устраняется. В последнем случае необходимо рассматривать проблему оптимальной организации деятельности оператора в целом, или, как ее формулирует Б. Ф. Ломов [79], — проблему проектирования деятельности оператора, указывая на необходимость выделения и решения основных составных проблем [76]: передача информации человеку-оператору, организация управляющих действий человека-оператора, структура сенсорных и мыслительных процессов, надежность человека-оператора. В числе других называется и проблема распределения функций между человеком и машиной в системах управления.

Нельзя согласиться с В. Я. Дубровским и Л. П. Щедровицким [50], предлагающими немедленно перейти от решения этих частных проблем к социальной организации деятельности. Такой переход, каким бы заманчивым он ни казался, сейчас невозможен, поскольку он не подготовлен достаточными исследованиями по перечисленным частным проблемам, в том числе по изучению структуры сенсорной и мыслительной деятельности («внутренних» средств) оператора и методам ее оптимизации с помощью соответствующих технических («внешних») средств деятельности, по распределению функций между человеком и машиной и др.

Проблема социальной организации деятельности бесспорно перспективна, однако в настоящее время нет средств для ее конструктивного решения, поэтому практически целесообразно не снимать с повестки дня более частные проблемы организации деятельности, а, напротив, интенсифицировать их решение, подготавливая переход к комплексному проектированию деятельности.

Проблема распределения функций между человеком и автоматическими устройствами, определения места и роли человека-оператора в системе непосредственно связана с исследованием процессов обмена информацией между человеком и автоматом, который характеризуется комплексом различных показателей, таких, как назначение информации, передаваемой от автомата к человеку и от человека к автомату, тип информации, «язык», с помощью которого происходит «общение» человека с автоматом, и др. По этим признакам могут быть составлены рабочие классификации систем «человек—автомат».

В зависимости от назначения информации они могут делиться на следующие классы:

1. Системы, в которых информация служит для осуществления контроля за состоянием одной части системы со стороны другой части и принятия соответствующего решения.

Чаще всего именно человек оценивает состояние и функционирование автомата, однако с появлением, в частности, биотелеметрических систем и медицинских диагностических вычислительных комплексов распространение получили и такие системы, в которых автоматическая аппаратура

следит за состоянием и деятельностью человека, играющего в этом случае роль «контролируемого» объекта.

2. Системы, в которых информация выполняет роль командных сигналов, по которым та или иная часть системы включается в работу (в частности, информация может указывать в таких случаях порядок выполнения цепи операций).

3. Системы, в которых информация используется для обучения человека с помощью автомата или, наоборот, для обучения автомата с помощью человека.

По виду сигналов, с помощью которых информация передается от человека к автомату и от автомата к человеку, системы делятся на следующие классы:

1. Системы, в которых информация передается только в аналоговой форме.

2. Системы, в которых информация передается только в дискретной форме.

3. Системы, в которых информация передается в смешанной форме — аналоговой, дискретной и аналого-дискретной.

В зависимости от причини появления на выходе автомата сигналов о необходимости вмешательства человека системы делятся следующим образом:

1. Системы, в которых наиболее характерными являются сигналы о возникновении в процессе работы автоматических устройств ситуаций, не предусмотренных в алгоритмах и программах; от человека в подобных случаях требуются оперативное вмешательство и принятие на себя части или всех функций управления.

2. Системы, в которых автомат осуществляет контроль за собственной работой и в случае каких-либо нарушений выдает человеку соответствующие сигналы; на человека в таких системах возлагаются в основном функции наладчика.

3. Системы, в которых автомат подает сигнал в случае достижения им предела возможностей автоматического управления (регулирования); при этом человек должен найти новые варианты технологической схемы или процесса, при которых автоматическое управление вновь станет возможным, или осуществлять его вручную (отличие от систем типа 1 в этом ряду состоит в том, что действия в этом случае заранее известны и разработчикам, и оператору, но они не введены в программу из-за ограниченного объема памяти автомата и малой вероятности появления такой ситуации).

4. Системы, в которых автомат из-за отсутствия некоторых чувствительных элементов нуждается в ручном вводе информации, получаемой человеком органолептическим путем (общий осмотр оборудования, прослушивание двигателя, опознание сложных образов и т. п.).

По способу «обобщения» человека и автомата системы делятся на два класса:

1. Системы, в которых осуществляется декодирование информации с целью передачи ее от одного звена к другому.

2. Системы, в которых человек и автомат используют один «язык».

По типу подачи информации, вырабатываемой автоматом, для восприятия ее человеком системы делятся следующим образом:

1. Системы, в которых информация выдается человеку в отвлеченной форме (в виде цифр, формул, показаний стрелочных контрольно-измерительных приборов и т. п.).

2. Системы, в которых информация воспроизводится в графической форме (в виде графических функциональных зависимостей, диаграмм и т. п.).

3. Системы с отображением информации в изобразительной форме (в виде мнемосхем, географических карт, панорам местности и т. п.).

4. Системы, в которых информация выдается в виде буквенно-цифровых обозначений, текстов (на световых табло, электронно-лучевых трубках, лентах автоматических печатающих устройств и т. п.).

Перечисленные пять квалификаций, наверное, не исчерпывают всех практически возможных случаев, но они дают базу для дальнейшего более детального анализа систем «человек—автомат».

Общая эффективность действия сложной системы управления зависит от ряда факторов: совершенства технологического оборудования и системы комплексной автоматизации; уровня профессионального мастерства оператора; взаимной приспособленности человека и автомата как звеньев единой комплексной системы управления.

Последнее требование означает, в частности, организацию подачи информации о состоянии управляемого объекта в такой форме, которая наиболее соответствует закономерностям восприятия и переработки ее человеком. В связи с этим конструирование СОИ на основе только технических предпосылок не может обеспечить надежной и высокоэффективной работы оператора. Это обстоятельство было подтверждено нами, в частности, в процессе анализа деятельности операторов электростанций с разного рода щитами управления, проведенного в 1960—1961 гг. при подготовке к проектированию СОИ крупного энергоблока ТЭЦ, впервые автоматизированного с применением УВМ [21, 91]. Анализ бесспорно доказал, что без широкого использования инженерно-психологических методов исследования такая проектная задача успешно решена быть не может. Все наши инженерно-психологические исследования впоследствии были посвящены проблеме построения СОИ, являющихся наиболее ответственными и сложными согласующими элементами в системах «человек — автомат». На основе данных, получаемых от информационной модели, оператор (диспетчер) оценивает состояние объекта или системы, судит о характере отклонений в технологическом режиме, принимает решения относительно наиболее эффективного воздействия на объект, контролирует результаты своих действий, планирует операции и т. д.

Как показал В. П. Зинченко, «первым и главнейшим требованием, предъявляемым к информационной модели, является ее адекватность внешней обстановке» [49, стр. 353]. Для обеспечения адекватности информационной модели рекомендуется выполнять при ее построении ряд общих психологических требований:

Информационная модель должна представлять лишь существенные свойства, отношения, связи, взаимодействия управляемых объектов, являясь всегда упрощенным и неполным отражением действительности.

Определение степени упрощения, выбор объема представляемой человеку информации является одной из целей психологического анализа функций оператора. Информационная модель должна быть наглядной, чтобы человек мог воспринимать сведения быстро и без излишнего кропотливого анализа. В разных случаях наглядность может пониматься по-разному: это либо отображение топологических, либо функциональных свойств объектов и т. д. Большое значение имеет выбор оптимального способа кодирования информации.

Одним из важнейших требований является правильная организация структуры информационной модели. Вместе с тем информационная модель как элемент производственной среды, длительно находящийся в поле зрения работающего человека, должна рассматриваться при проектировании не только как звено канала передачи информации, но и как объект эстетического восприятия.

Учет кратко перечисленных выше требований в практике создания информационных моделей оказывается нелегкой задачей. До сих пор в литературе нет источников, где достаточно глубоко, всесторонне и последовательно рассматривалась бы эта проблема; тем более не было попыток создать достаточно общую психологическую теорию синтеза многокомпонентных СОИ. Для построения такой теории необходимо разработать ряд фундаментальных аналитических и экспериментальных методов исследования, изучить множество взаимосвязанных факторов, влияющих на эффективность восприятия информации человеком, накопить большой опыт конструирования, создания и эксплуатации СОИ всех основных типов при различных функциях и условиях труда операторов и диспетчеров.

Информационная система должна быть построена так, чтобы, с одной стороны, максимально облегчить оператору выполнение его стандартных функций, а с другой — обеспечить ему возможность находить решение нестандартных, проблемных задач, реализовать важнейшую миссию человека в системе — руководить ее самоорганизацией при возникновении непредвиденных разработчиками автоматических устройств ситуаций или возмущений, представляющих угрозу для эффективного функционирования или даже устойчивости системы.

Анализ показывает, что эти два требования в значительной степени принципиально противоречат друг другу, их очень трудно согласовать между собой. Повышение скорости и надежности действий оператора в стандартных ситуациях требует приспособления отображаемой информации к алгоритмам действий оператора в этих ситуациях, в частности, оно требует адекватности структуры средств отображения информации структуре сенсорных, мыслительных и исполнительных действий человека и решительного изъятия информации, не относящейся к кругу выверенных, стандартных задач. В то же время адаптивные функции человека в непредвиденных ситуациях могут быть успешно реализованы лишь при наличии соответствующего запаса информации, который обычно почти полностью отсутствует в информационных системах, точно приспособленных к решению определенных задач, известных разработчикам и описанных в инструкциях.

Получается любопытный парадокс: чем тщательнее психологи и разработчики исследовали деятельность оператора, чем точнее они составили алгоритмы его действий, выбрав и точно скомпоновав на этой основе средства отображения инфор-

мации, тем меньше у системы шансов выжить (сохранить в допустимых пределах заданные критерии) при возникновении ситуации, которую они не смогли предусмотреть. При строго детерминистском подходе к созданию средств отображения информации система «человек—автомат» уподобляется конечному автомату, утрачивает гибкость и способность к самонастройке.

Поэтому на практике приходится отыскивать некоторое компромиссное решение, при котором средства отображения информации приспосабливаются для максимального облегчения оператору решения наиболее вероятных и важных задач, но вместе с тем ему обеспечивается возможность добора необходимой информации с помощью вызывных (избирательных) систем контроля, телефонных каналов, телемеханических средств и другими способами при возникновении существенной неопределенности в оценке ситуации на объекте. Для обоснованного решения этих вопросов необходимо иметь данные о факторах, обусловливающих сложность оперативных задач и их зависимости от структуры СОИ.

При решении вопроса о степени детерминированности средств отображения информации известными алгоритмами задач необходимо соотносить и учитывать выигрыш в скорости и надежности решения стандартных (предвидимых) задач при использовании детерминистских средств отображения, вероятность возникновения непредвиденных ситуаций и неуспеха в их ликвидации вследствие того, что применены детерминистские средства отображения, соотношение величин выигрышей и проигрышей, возможность применения автоматических средств защиты и блокировки для минимизации потерь вследствие неуспехов в решении человеком проблемных оперативных задач и др.

Психологические проблемы оптимальной организации деятельности операторов и диспетчеров теснейшим образом связаны с проблемами синтеза всей системы, включая технологические объекты, линии связи, управляющие и вычислительные устройства, рассматриваемыми в рамках системотехники.

Полный цикл обращения информации в процессе оперативного управления включает в себя следующие элементы и этапы:

1. Реальный объект, полное состояние которого описывается n-мерным пространством параметров. Строго говоря, n — бесконечно большое число.

2. Комплекс датчиков и вторичных приборов телеизмерения и телесигнализации состояний основных параметров объекта. Таким образом, на средствах отображения информации воспроизводится конечномерный образ — информационная модель объекта.

3. На основе восприятия информационной модели и априорных знаний оператор с помощью внутренних средств воссоздает оперативно-психическую модель реального объекта.

4. Далее следует реализация принятого решения либо путем воздействия на органы управления, либо посредством команд, отдаваемых подчиненному персоналу.

Оператор, воздействующий на объект, скажем, в режиме слежения, имеет возможность с незначительным запаздыванием наблюдать по средствам отображения результаты своих воздействий и корректировать ранее принятое решение. Однако часто оператор вынужден работать по частично разомкнутому циклу: приняв решение, он отдает множество команд в разные пункты, и только после исполнения всех их может судить о результатах принятых мер и справедливости поставленного диагноза о состоянии системы.

В настоящее время не существует строгих аналитических методов, позволяющих проследить весь цикл преобразования информации в процессе оперативного управления. Задача эта очень сложна, эффективны здесь пока в основном лишь качественный анализ и экспериментальные исследования конкретных систем. При этом в некоторых случаях приходится определять такое традиционно сложное для точного описания понятие, как пропускная способность человека-оператора.

Пропускная способность человека может быть выражена как интервал значений математического ожидания числа сигналов, обрабатываемых человеком в единицу времени, так что в течение заданного времени работы величины определенных критериев оценки деятельности оператора находятся в допустимых пределах.

Очевидно, что пропускная способность человека лишь в исключительных случаях может быть выражена в унифицированных единицах (например, в битах информации). Чаще удается составить смешанную качественно-количественную характеристику единичных сигналов (задач, заявок) в нескольких вариантах (например, по структуре и уровням сложности), а затем отнести пропускную способность человека к числу таких единичных сигналов.

Критерии оценки деятельности оператора должны, как правило, учитывать показатели эффективности работы системы и психофизиологические характеристики его состояния. Существенное влияние на значение этих критериев оказывает конструкция СОИ. Сложность создания общих теоретических основ исследования и проектирования СОИ вытекает из того, что они являются объектом взаимосвязанного изучения ряда наук и областей знаний. Прежде всего комплексный характер систем управления, включающих кроме разнообразных технических (технологических, измерительных, счетно-решающих и управляющих) элементов, человека-оператора, обусловливает возможность и необходимость применения при исследовании СОИ теоретических положений кибернетики. Далее, так как СОИ обычно является компонентом системы управления, относящейся к классу больших систем, и отражает состояние всей си-

стемы, в том числе десятков и сотен параметров, оно, следовательно, также должно строиться на основе теории систем. Сохраняется та же, что и при проектировании больших систем, последовательность решения различных вопросов, используется тот же набор методов аналитического исследования (теория массового обслуживания, теория игр, теория информации, теория вероятностей и математическая статистика). Как показал опыт, применение аппарата, взятого на вооружение и развитого проектировщиками больших систем, при исследовании СОИ несомненно перспективно [21].

Важнейшей научной областью, достижения и научные методы которой широко используются при проектировании СОИ, является инженерная психология.

Кардинальной психологической проблемой в этой области является соответствие системы отображения информации структуре перцептивных и мыслительных процессов при решении оперативных задач, т. е. соответствие оперативно-информационной модели объекта его оперативно-психической модели.

Под оперативно-психической моделью мы понимаем психическое отражение человеком состояния реального дистанционно управляемого объекта в аспекте возникшей оперативной задачи. Понятие оперативно-психической модели принципиально отличается от рассматривавшихся в разделе I известных по литературе таких понятий, как концептуальная модель, мозговая модель, оперативный образ и др., поскольку оперативно-психическая модель является не простой совокупностью всех знаний об объекте, а узкоспециализированным психологическим инструментом решения конкретной задачи. Например, выдвигаемое в работах ряда авторов требование адекватности структуры статической мнемосхемы психической модели объекта, подчеркивает тем самым статичность оперативного образа и одновременно указывает на жесткую связь между структурой мнемосхемы и психической моделью.

Такая позиция обусловливает ряд принципиальных ошибок. С одной стороны, сравнение вариантов компоновки мнемосхем проводится обычно в условиях сформировавшегося навыка управления, точнее, на стабильном уровне обученности испытуемых решению малого набора задач, когда на графиках динамики обучения образуются «плато», поскольку процесс решения мыслительной задачи заменяется реакцией выбора. Выводы о преимуществах усовершенствованных вариантов мнемосхем основываются при этом на статистически недостоверных различиях во времени выполнения заданий испытуемыми по сравниваемым вариантам. С позиций развиваемой нами структурно-психологической концепции отсутствие различий на этом этапе обучения объяснимо тем, что стратегия поведения испытуемых при повторении задач в лаборатории, где обычно нет стрессовых ситуаций, дезавтоматизирующих навыки управления, становится однозначной. Иначе говоря, страте-

гия решения уже не коррелирует со структурой СОИ. С другой стороны, стремление доказать значимость связей между структурой отображения информации и оперативным образом приводит к отнесению к изучаемым в этом аспекте факторам и таких, которые имеют фундаментальную филогенетическую основу, например, способность особо выделять и опознавать человеком вертикальные и горизонтальные линии из всей совокупности направлений. Влияние этих естественных навыков человека необоснованно относится к воздействию структуры информационных и психических моделей.

Высокая сложность и большая научно-практическая значимость проблемы обусловливания мыслительной деятельности операторов структурой представления информации требует особенно внимательного изучения особенностей психического отражения человеком сложных управляемых объектов.

Оперативно-психическую модель характеризуют следующие основные свойства:

1. Неполное, вероятностное отражение объекта человеком-оператором (в отличие от этого в литературе встречаются утверждения об *изоморфизме* между объектом и его концептуальной моделью [10, 101] или оперативным образом [92]).

Адекватность отражения вероятностной структуры управляемой системы зависит от развития предметности в мышлении оператора и приближения субъективных распределений значений ситуаций к объективному, детерминированному объективной физической структурой системы. Обеспечение этого условия требует либо достаточно длительного стохастического научения операторов в дополнение к теоретическому обучению, либо специальных методов сбора, обработки статистического материала и представления его операторам.

2. Вероятностная связь между оперативно-информационной и оперативно-психической моделями. За исключением особых случаев, рассматриваемых нами, в частности, в аспекте теории условно-абстрактных СОИ, оперативно-информационная модель представляет неполную информацию, необходимую для формирования оперативно-психической модели и решения на ее основе оперативной задачи. Оператор часто пользуется другими информационными каналами, актуализирует в памяти скрытые сведения об объекте и т. д. Кроме того, надежность и достоверность отображаемой на оперативно-информационной модели информации не абсолютны. Таким образом, реально возможен весь диапазон значений статистических связей ОПМ с ОИМ (например, в виде коэффициента корреляции $-1 < R < 1$).

3. Системное отражение объекта, связей между его элементами. Как следствие этого важного свойства возникает особое явление *системно-психологической индукции*, которое состоит в непроизвольном включении в оперативно-психическую модель и процесс решения мыслительных оперативных задач тех элементов объекта, которые не относятся к числу данных, ре-

левантных конкретной задаче, но вообще связаны с таковыми структурой реального объекта. Основу явления составляют многообразие и сложность взаимосвязей отражаемого человеком объекта, а также рассогласование структур оперативно-информационной и оперативно-психической моделей объекта. Явление системно-психологической индукции — одна из причин превращения реальных значений факторов сложности оперативных задач над теоретическими, оптимальными.

4. Изменение вероятностной структуры оперативно-психической модели (ОПМ) одной и той же ситуации на объекте в ходе обучения человека-оператора (макростохастическая адаптация ОПМ), выполнения им информационно-поисковых и исследовательских действий при решении оперативной задачи (микростохастическая адаптация ОПМ). Важные следствия макростохастической адаптации оперативно-психической модели — рассматриваемые ниже *явления интерференции* приемов решения задач и свертывание процессов решения задач при их повторении. Оба упомянутых вида адаптации оперативно-психической модели отражаются на динамике субъективных распределений значений элементов объекта в различных ситуациях.

5. Гетерогенность оперативно-психической модели — неоднородность (например, по детальности информации) отражения различных элементов управляемого объекта (системы) в зависимости от их значимости для решения возникшей оперативной задачи. Гетерогенность ОПМ играет в мотивационно-личностном плане важную роль дополнительного стимула решения оперативной задачи, приведения управляемого объекта к равновесному, а ОПМ объекта — к гомогенному состоянию, когда психическое отражение объекта теряет свойство оперативности, а полученные в ходе решения данной задачи новые сведения направляются в долговременную память человека, ассимилируясь общей, генеральной психической моделью управляемого объекта.

6. Многоуровневый характер оперативно-психической модели. Например, в зависимости от характера аварии в энергообъединении диспетчер формирует такую модель, в которой степень подробности отражения различных объектов варьируется в широких пределах, соответствуя по своей детализации разным ступеням иерархической системы управления энергообъединением.

7. Адекватность форм психического отражения объекта. В зависимости от специфики объекта, функций человека по его управлению, конкретной оперативной задачи, способов представления человеку общей (постоянной) и оперативной информации и других факторов ОПМ может включать в себя различные формы психического отражения: от восприятия (например, при различении и идентификации сигналов на экране локатора) или сенсомоторных рефлексов (при многосвязном регулировании технологических параметров или управлении

транспортным средством) до образного представления или теоретического мышления.

Оперативно-психическая модель должна соответствовать следующим общим требованиям:

1. Число степеней свободы, характеризующих оперативно-психическую модель как систему и адекватных по своему составу реальным связям в системе, не должно быть меньше числа степеней свободы реальной системы, существенных с точки зрения управления системой.

2. Оперативно-психическая модель должна позволять индивидууму предвосхищать дальнейший ход событий в системе. Это необходимо не только для осуществления опережающих воздействий, но и вообще для преодоления естественной неопределенности — конкретное состояние динамической системы в момент получения человеком информации уже не соответствует этой информации. Таким образом, решение, не учитывающее существенных изменений системы за период его принятия и реализации, может быть ошибочным.

3. Если реальная управляемая система имеет сложную многосвязную структуру, то оперативно-психическая модель должна позволять человеку приходить к решению оперативной задачи и проверять верность найденного решения несколькими путями. Многовариантность способов оценки состояния системы является дополнительным условием преодоления интерференционного влияния привычных, стандартных способов решения в случае возникновения принципиально новой ситуации. Это свойство можно назвать противоинтерференционной устойчивостью оперативно-психической модели. Более подробно явление интерференции решений рассмотрено в гл. 2.

Подводя итог рассмотрения инженерно-психологических аспектов проблемы построения СОИ, дадим определение ряда основных понятий в этой области, таких как оперативно-психическая модель объекта (ОПМ), психическая модель объекта (ПМ), оперативно-информационная модель объекта (ОИМ), информационная модель объекта (ИМ), средство отображения информации и система отображения информации.

Если ОПМ, как отмечалось выше, является психическим отражением конкретного состояния объекта, специализированным для решения возникшей оперативной задачи, то ПМ — это психическое отражение объекта, служащее основой решения всех оперативных задач, возложенных на человека-оператора. ПМ — это онтогенетическое, стохастически обобщенное отражение объекта, корректируемое посредством анализа адекватности оперативно-психических моделей, результатов решения оперативных задач, новых профессиональных знаний и навыков по управлению объектом.

ОИМ — это совокупность данных, отображаемых автоматически или по вызову оператора в ходе решения конкретной оперативной задачи. ОИМ — заместитель объекта в процессах

восприятия (в некоторых случаях — и мышления), включенных в решение данной задачи.

Термин «информационная модель» введен в инженерную психологию В. П. Зинченко. В системе рассматриваемых нами понятий добавим к исходному определению [59, 94], что ИМ — это потенциальная основа формирования любой ОИМ, включающая комплекс средств отображения информации, предназначенных для решения оператором всех возложенных на него задач.

Средство отображения информации — это любой элемент, непосредственно воспринимаемый человеком-оператором и предназначенный для передачи ему информации. Под средством отображения информации понимается отображающая часть сигнального табло, контрольно-измерительного прибора или такого многокомпонентного информационного устройства, как, например, мнемосхема со встроенными телевизионными видеоконтрольными устройствами и дисплеями.

Система отображения информации — это комплекс средств отображения информации, а также в определенных случаях — и алгоритмов специальной обработки и подготовки информации, предназначенной для решения человеком-оператором задач по управлению системой. Во многих случаях понятия системы отображения информации [1] и многокомпонентного средства отображения информации идентичны и совпадают с понятием информационной модели объекта. В таких случаях мы будем пользоваться термином «средство отображения информации» (СОИ).

Следующей научной областью, на которой основано создание СОИ, является техническая эстетика. В процессе художественного конструирования СОИ должны учитываться и широко применяться закономерности и приемы художественной композиции и цветоведения. Эти вопросы обстоятельно рассматриваются в гл. 9, 10.

Научную основу исследования и разработки СОИ составляет также общая теория знаков и знаковых систем — семиотика. Дело в том, что СОИ удовлетворяет основному определению знака в семиотике, поскольку оно представляет собой материальный чувственно воспринимаемый предмет, выступающий в процессах познания и общения в качестве представителя (заместителя) другого предмета и используемый для получения, хранения, преобразования и передачи информации о нем. Значение СОИ, его существенное содержание — это та информация о состоянии обозначаемого объекта и способах управления им, которую оно несет.

---

[1] Применительно к АСУ более точно было бы говорить «подсистема отображения информации», термин в тексте оправдан, поскольку системы отображения информации — главный и в определенной степени самостоятельный объект нашего исследования.

При рассмотрении СОИ условимся с некоторыми допущениями считать знаками и такие его детали, которые сами по себе не обозначают других предметов, но служат конструктивными элементами, осуществляющими в сочетании с другими обозначение сложного предмета (объекта). В частности, мнемосхемы составляются из знаков, часть которых может самостоятельно обозначать предметы и явления (символы параметров и органов управления); другая часть входит в состав сложных комбинаций. Например, из отрезков технологических линий составляется символ управляемого агрегата или его функциональная схема.

При выборе алфавитов знаков для СОИ могут использоваться некоторые рекомендации, выработанные в теории математических и других знаковых систем, традиционно исследуемых в семиотике.

В частности, отношение знака к обозначаемому явлению или объекту должно быть устойчивым (повторяющимся, регулярным). Такое отношение является необратимым (односторонним, несимметричным) и не носит причинно-следственного характера, т. е. может выбираться в значительной степени произвольно, причем между знаком и объектом, как правило, не сохраняется внешнего сходства.

При разработке СОИ следует учитывать, что наличие такого сходства фиксирует мысль оператора, особенно в период обучения, на внешних чертах объекта и мешает осознанию более существенных с точки зрения контроля и управления признаков, которые, как правило, непосредственно не воспринимаются.

Некоторая обоснованная произвольность отношения между СОИ и управляемым объектом не только не является препятствием при восприятии человеком информации о ходе технологического процесса, но, напротив, составляет необходимое условие обобщения и унификации СОИ однотипных по существу объектов управления, различающихся несущественными конструктивными признаками.

Длина алфавита, т. е. количество различных знаков в СОИ, определяется разнообразием и числом градаций явлений, информация о которых должна передаваться с помощью СОИ. Алфавит данной длины может быть на практике реализован с помощью различных наборов знаков. Задача заключается в том, чтобы выбрать для обозначения совокупности состояний объекта оптимальный набор знаков. Одним из важнейших определяющих критериев при этом является психологическая оценка легкости запоминания, скорости и безошибочности опознания.

Системы знаков, применяемые в СОИ, могут быть отнесены к искусственным неязыковым системам специального назначения. Как и все знаковые системы, они могут исследоваться в трех аспектах: синтаксическом (отношение знаков друг к другу), семантическом (отношение знаков к обозначаемым объектам и явлениям) и прагматическом (отношение знаков

к использующим их людям). Связь между этими аспектами очевидна: например, отношение знака к объекту зависит от интерпретации знака субъектом. Применительно к техническим знаковым системам работы в этом направлении по сути только начинаются.

Сигнальная функция СОИ может считаться выполненной, если некоторое множество его элементов (и их состояний) изоморфно множеству элементов (и их состояний) сигнализируемого объекта [10]. Очевидна условность с точки зрения практики такого обособленного рассмотрения СОИ, составляющего неотъемлемую часть совокупности элементов и факторов, определяющих эффективность системы «человек—машина». Л. М. Веккер [10] считает, что кроме изоморфности двух упомянутых множеств элементов (и их состояний) необходимо еще их сходство по пространственно-временной структуре и в качественном отношении. Это верно для существующих информационных систем и их СОИ, поскольку в настоящее время оперативное управление и обучение организуются таким образом, чтобы оператор или диспетчер ясно представлял себе существо объектов и процессов, сигнализируемых в СОИ.

Однако теоретически это требование нам не представляется необходимым. Допустим, что СОИ построено как знаковая модель на основе формализации подробных данных об управлении объектами. Исходя из теории подобия, мы вправе утверждать, что оно может при этом отражать два или несколько различных объектов, последовательности операций управления которыми совпадают. При условии абстрагирования от свойств конкретных объектов может быть составлен универсальный алгоритм — система правил манипулирования знаками информационных оперативных моделей, верная для некоторого обозримого класса систем управления. Причем в ряде случаев действия, производимые оператором со знаками, могут им вообще конкретно физически не интерпретироваться.

Любая модель объекта, в том числе его информационная модель, основана на обобщении структуры объекта, абстрагировании от его многих несущественных подробностей, некотором отвлечении от детального физического и технологического содержания происходящих в нем процессов. При расшифровке поступающей информации оператор может мысленно воссоздавать это скрытое за панелью СОИ содержание более или менее подробно в зависимости от того, какая доля сведений, достаточных для принятия и реализации оперативных решений, приходится на непосредственно воспринимаемую информационную модель. Чем скрупулезнее разобрались в физике объекта разработчики СОИ, чем больше у них опыт и знания об управлении этим объектом, тем полнее на СОИ могут быть отображены оперативные свойства объекта, тем меньше доля и самая необходимость в информации, скрытой от оператора за СОИ и связанной с физикой объекта, не закодированной на СОИ.

В этом случае можно говорить об изоморфизме информационной модели оперативной структуре объекта управления, но не его физико-технологической структуре. Подобные свойства моделей изучены еще при зарождении теории моделей и алгебры логики.

В одном из своих трудов Дж. Буль писал: «Тот, кто знаком с современным состоянием теории символической алгебры, знает, что верность процесса анализа не зависит от интерпретации встречающихся символов, а только лишь от знаков их комбинирования. Всякого рода интерпретация, не нарушающая справедливости предложенных отношений, одинаково допустима, а поэтому один и тот же прием может дать при одной интерпретации решение проблемы теории чисел, при другой интерпретации — решение проблемы геометрии, при третьей — решение проблемы динамики или оптики».

На основе теории моделей и экспериментально-психологического материала [21] нам удалось доказать, что теоретически возможно построение СОИ как системы знаков с простым и ясным алгоритмом манипулирования безотносительно к содержательной интерпретации знаков, т. е. к физико-технологическому существу объекта, и в этом смысле абстрактного СОИ, представляющего новый обширный класс систем отображения информации.

В каких случаях такое абстрагирование СОИ может быть практически полезно? Ответ на этот вопрос важен для определения случаев применения абстрактных СОИ.

1. Если учет физико-технологических особенностей объекта не повышает эффективность труда оператора и такая информация оказывается иррелевантной. На СОИ можно частично вынести обобщенную структуру и алгоритмы управления, отрабатывая их для ввода в автомат. Происходит «самоуничтожение» операторской профессии, соответствующей низшей ступени иерархической системы управления.

2. Если абстракция снижает нервно-эмоциональную напряженность оператора или способствует проявлению индивидуальностей операторов, в том числе по характеру ассоциаций, аналогий, творческих подходов к задачам.

3. Если снижаются требования к квалификации операторов, упрощается их подготовка.

В экспериментах нами выявлено, что отображение вместо обычных многочисленных физических параметров объекта комплексных отвлеченных параметров, характеризующих в целом состояние объекта или его узла (такие параметры в теории моделирования называют инвариантами-комплексами), резко снижает уровень сложности задач оперативного управления многосвязными объектами. Кроме того, было предложено в некоторых случаях применять на операторских и диспетчерских пунктах быстродействующие модели управляемых объектов, с тем чтобы операторы при необходимости могли предварительно «проигрывать» возможные, в том числе совершенно новые вари-

анты оптимизирующего воздействия на объект, сравнивать их по некоторым критериям эффективности и затем уже реализовывать на объекте.

В серии экспериментальных исследований нами применялись аналоговые вычислительные машины, одна группа которых играла роль относительно медленных «технологических объектов» с несколькими связанными входными и выходными параметрами, другая — их моделей, работающих в масштабе времени $M_t = 1:10$. Эксперименты показали, что применение быстродействующих моделей позволяет оператору более уверенно выбирать входные каналы, воздействие на которые наиболее эффективно при данном отклонении выходных параметров. Однако дальнейшая реализация процесса связанного регулирования зависит прежде всего от индивидуальных особенностей и навыков регулирования испытуемого, способности быстро переключаться с действий с одними скоростями протекания процессов на действия с резко отличными скоростями. Эффективность действий испытуемых оценивалась по интегральному критерию оценки качества процессов регулирования параметров «объекта» и общему времени регулирования от момента подачи сигнала об отклонении выходного параметра до его нормализации, включая время «проигрывания» вариантов решений на модели. Как выяснилось, существенное значение имеет наглядное представление переходных процессов, например при помощи регистрирующих приборов (см. гл. 4).

Независимо от справедливости аналогии между трудом оператора и трудом математика идея создания СОИ как абстрактных знаковых систем может быть практически реализована в несколько упрощенном виде, прежде чем переходить к сложным динамическим информационным моделям объектов управления. В качестве примеров могут служить командно-информационный и структурно-динамический типы СОИ.

Подводя итог, можно указать на то, что теперь уже выявляется возможность существенно расширить область поиска оптимальных в каждом случае типов СОИ. Наряду с широко применяемыми в настоящее время ассоциативными СОИ в практике оперативного управления могут быть в дальнейшем использованы и абстрактные СОИ.

Ассоциативные СОИ служат для облегчения соотнесения знаний оператора об объекте с информацией, поступающей к нему и характеризующей состояние объекта в каждый момент. В этом случае оператор должен обладать глубокими знаниями об управляемом технологическом процессе, с тем чтобы при решении оперативных и плановых задач восстановить необходимую часть знаний в памяти (актуализировать), сложить и сопоставить их с данными, получаемыми от СОИ.

Абстрактные СОИ служат сенсорной опорой для выполнения человеком логических или математических операций при управлении объектом. Подробное знание человеком

технологического существа объекта в этом случае не является обязательным условием успешного оперативного управления; важно, чтобы он владел достаточно общими правилами манипулирования знаками — алгоритмами управления в зависимости от тех или иных комбинаций поступающих сигналов, конкретной воспринимаемой информации.

Относительно тонким является вопрос отображения целей оперативного управления при применении абстрактных СОИ. Очевидно, не всегда можно и целесообразно разъяснять каждому оператору цели функционирования всей системы, которые в общем случае могут широко варьироваться; важно, что эти цели либо заранее определены коллективом разработчиков, либо находятся под контролем диспетчеров на более высоких иерархических ступенях системы управления.

Необходимо заметить, что деление СОИ на ассоциативные и абстрактные основано не только и даже не столько на различиях их собственных, в том числе конструктивных, характеристик, сколько на различиях в структуре деятельности операторов. Ассоциативное СОИ служит прежде всего опорой для воссоздания психической модели конкретного объекта, происходящих в нем процессов. Оператор суммирует данные, полученные от такого СОИ, с априорными знаниями об объекте, целеустремленно добирает недостающую оперативную информацию с помощью других средств, подчиненного ему персонала или путем личного обследования объекта. Таким образом, ассоциативное СОИ служит посредником в сенсорных и мыслительных процессах между оператором и объектом.

Абстрактное СОИ отображает полную информацию, необходимую для оперативного управления. Соотнесение ее в разных режимах с физикой объекта, оценка ее адекватности реальной ситуации проведены заранее разработчиками. Следовательно, абстрактное СОИ само может условно выступать в качестве «объекта управления».

Таким образом, необходимо исследовать два существенно различных вида деятельности операторов: с СОИ как неполной информационной моделью объекта управления и с СОИ как полной информационной моделью объекта управления и разработать методы оптимизации структуры сенсорной и мыслительной деятельности операторов для этих случаев выбора адекватных структур СОИ.

В этом плане необходимо исследовать относительное значение для деятельности операторов конкретного существа (физики) технологических процессов, протекающих в объекте, и более отвлеченной оперативной схемы — структуры взаимодействия параметров объекта.

Для обоснования такой постановки вопроса был проведен следующий простой эксперимент.

Была взята мнемосхема химического реактора (рис. 1, *а*) с обозначениями: *А* — первый исходный продукт; *В* — второй исходный продукт;

$B1$ — сброс отходов реакции исходных продуктов A и B; $B2$ — возврат продуктов B из отходов B'; AB — конечный продукт; θ_{AB} — качество (состав) конечного продукта; G_{AB} — производительность реактора (выход продукта AB в единицу времени); N — давление в реакторе; *1, 2, 3, 4* — символы органов управления со встроенными указателями положения (ключи были расположены на пульте перед испытуемым).

Структурная схема регулирования выходных параметров реактора θ_{AB}, G_{AB} и N за счет изменений расходов A, B, B', B'' представлена на рис. 1, *б*, где $W^*_{xy}(p)$ — изображения по Лапласу передаточных функций выход—вход, например $W^*_{G_A G_{AB}}$ — зависимость G_{AB} от G_A (в опытах была представлена в виде формулы).

Стрелка со сплошной чертой — сильное воздействие входа на выход, со штриховой чертой — слабое воздействие. Около стрелок показан знак пропорции между входом и выходом: плюс (+) — прямая пропорция, минус (—) — обратная.

Затем был выбран теплообменник, который имеет аналогичную структурную схему и математическую модель регулирования и может быть отображен такой же мнемосхемой, как реактор на рис. 1, *а*. В качестве такого теплообменника был взят подогреватель мазута, используемого для сжигания в топке энергетического котлоагрегата. В этом случае обозначения на мнемосхеме имеют следующий смысл: A — холодный мазут; B — основной греющий пар; B' — слив конденсата; B'' — утилизация тепла (побочный пар); AB — горячий мазут.

Соответственно изменилось и технологическое существо параметров: G_{AB} — расход горячего мазута; θ_{AB} — его температура; N — уровень конденсата в теплообменнике.

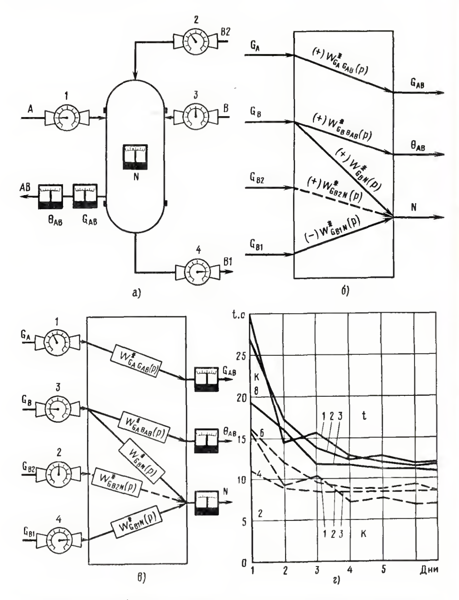
В качестве контрольно-измерительных приборов использовались показывающие вольтметры типа М-382 с нулем в середине шкалы, а также указатели положения типа УП-1. Модель в соответствии со структурной схемой была набрана на аналоговых вычислительных машинах типа МН-7.

Одной группе испытуемых, знакомых с управлением химическими объектами, давалось задание управлять реактором по данной мнемосхеме со встроенными приборами, другой группе в соответствии с их знаниями — теплообменником.

Экспериментатор вносил в модель возмущения, в результате чего выходные параметры отклонялись. Испытуемый должен был восстановить их исходные значения. Учитывая связанность параметров (влияние одного входного на несколько выходных параметров), задача довольно сложная и имеет ряд решений. В каждом случае испытуемые должны были соотнести значения выходных параметров между собой и с положением регулирующих органов на различных входных линиях, выбрать порядок воздействий на входные параметры и затем начинать регулирование. Последний этап действий испытуемого включал множество операций.

Анализ результатов экспериментов показал, что эффективность действий двух групп испытуемых, которая определялась по среднему значению интегрального критерия оценки качества процессов регулирования и времени решения задач, была одинаковой.

В дополнительной серии экспериментов третья группа испытуемых осуществляла те же функции регулирования, ориентируясь по СОИ, выполненному в виде структурной схемы со встроенными контрольно-измерительными приборами и символами органов управления (рис. 1, *в*). Причем этим испытуемым ничего не говорилось о технологической сути объекта, однако предъявлялись требования к их компетенции в области теории автоматического регулирования, поскольку они должны были легко разбираться в лапласовых изображениях передаточных функций. Эта группа испытуемых достигла таких же показателей, как и первые две (рис. 1, *г*). Причем их начальное обучение шло более быстро и целенаправленно, поскольку для них объект регулирования был воспроизведен на СОИ в более явной форме, чем на мнемосхеме.



1 *Опыты с варьированием содержания и способа отображения информации об объекте:*

а — миемосхема химического реактора; *б* — струкгуриая схема реактора; *в* — структурно-дииамнческое СОИ реактора; *г* — результаты решения задач в экспернментах (*1* — по миемосхеме реактора; *2* — по мнемосхеме теплообмеиника; *3* — по структурио-дииамическому СОИ; *К* — число выбегов параметра прн регулнровании)

Кстати, проводя экспериментальные исследования мнемосхем и других типов СОИ, мы неоднократно пытались найти простой и эффективный способ хотя бы грубого отображения передаточных функций управляемых объектов по различным каналам. В многосвязных объектах с относительно постоянными динамическими свойствами, описываемыми системами линейных уравнений, это могло бы значительно облегчить задачу оператора.

Чтение передаточных функций требует солидной теоретической подготовки. Делались попытки изображать на мнемосхемах кривые разгона. Это эффекта не дало. Несколько лучшие результаты были достигнуты при четком написании на СОИ коэффициентов усиления и постоянных времени по различным каналам. Этот вариант отображения динамики может быть использован в некоторых практических случаях.

Необходимо заметить, что повышение квалификации операторов, в особенности их знаний в области теории автоматического управления и математического моделирования объектов, является необходимым условием дальнейшего совершенствования систем централизованного управления, внедрения новых типов СОИ и более полного использования опыта операторов для составления различного рода программ для автоматов. Отмирание «старых» операторских профессий, полное алгоритмическое описание которых получено, и появление новых, характеризующихся, как правило, на первых порах разнообразием творческих задач, обреченность любого конкретного вида операторского труда и принципиальная неуничтожимость операторского труда как такового — характерные черты исторического развития этого вида деятельности. В процессе такого развития наряду с традиционной деятельностью операторов-эксплуатационников, работающих преимущественно по утвержденным инструкциям и пользующихся апробированными приемами управления, как справедливо указывают В. П. Зинченко и Г. Л. Смолян, должна получить распространение и обрести права гражданства деятельность операторов-исследователей. Причем это относится не только к научным экспериментальным комплексам, но и к промышленности.

Операторы-исследователи, прошедшие специальный отбор и расширенную практическую и научно-теоретическую подготовку, должны на специальных опытно-промышленных объектах, наделенных статусом экспериментальных, творчески искать и отрабатывать прогрессивные методы оперативного управления, осваивать новые типы СОИ. Являясь полноправными членами коллективов, проектирующих перспективные информационно-управляющие системы, операторы-исследователи могут во многом способствовать ускорению доводки алгоритмов автоматического управления, осуществлять обратную связь, часто еще нарушаемую при разработке систем оперативного управления таких систем так, чтобы полнее использовался опыт работы операторов.

Каков же вывод из описанного эксперимента? Управляемый объект (точнее, математическая модель, воспроизведенная на аналоговых вычислительных машинах) был один и тот же во всех трех сериях, а интерпретация его технологического существа

испытуемыми в первых двух сериях изменялась, а в третьей вообще не оговаривалась. Однако это обстоятельство не отразилось на эффективности действий испытуемых. Следовательно, можно считать, что содержательная интерпретация человеком информации, поступающей от СОИ, не является обязательным компонентом психического моделирования управляемого объекта, а следовательно, отображение физико-технологического существа объекта не является обязательным и при информационном моделировании. В отличие от этого знание человеком и отображение на СОИ информации об оперативных свойствах объекта во всех случаях оказывают решающее воздействие на качество управления объектом. Учитывая это обстоятельство, СОИ, которые человек использует в процессе оперативного управления, следует для большей строгости называть оперативно-информационными моделями.

Подобный вывод вовсе не означает, что во всех случаях СОИ не должны отражать технологического существа объекта или что следует предлагать оператору версию об ином объекте (как было в нашем эксперименте с мнемосхемой реактора и теплообменника). Это оправдано и возможно лишь в исключительных случаях.

Практическое значение вывода состоит в том, что на СОИ в первую очередь и по возможности максимально ясно должна выноситься информация об оперативных свойствах объекта. Информация о физико-химических свойствах технологических процессов, конструктивных особенностях объектов и т. п. должна дополнять первую, помогая оператору там, где это необходимо, запоминать динамические свойства объектов и взаимозависимость входов и выходов, находить решения сложных и оригинальных задач, т. е. успешно выполнять свои функции.

В гл. 3 описываются эксперименты, в которых испытуемые решают оперативные задачи, отличные от рассматривающихся здесь задач регулирования, также не вдаваясь в существо управляемых технологических объектов, опираясь при этом на СОИ командно-информационного типа. Наряду с работой испытуемых по структурной схеме объекта это может рассматриваться как первый шаг на пути формализации информационных моделей. Вообще же структура отображения должна быть адекватна структуре деятельности. Необходимо в каждом случае обеспечить подачу той информации и в такой форме, которая позволит операторам определенной квалификации с достаточной вероятностью принимать правильные решения, воздействовать на объект и поддерживать требуемые значения критериев надежности и эффективности.

Рационализация СОИ непосредственно направлена на облегчение таких операций, как обнаружение, различение, опознание, оценка информации, соотнесение сигналов, поиск дополнительной информации, оценка и корректировка воздействия

по принципу обратной связи. Эти процессы в деятельности оператора играют некоторую подготовительную роль, составляя информационную базу более сложных, мыслительных процессов.

Уровень ответственности и сложности деятельности оператора, а следовательно, и основные требования к ее организации определяются упоминавшимися выше особенностями оперативного управления, характеристиками применяемых средств автоматизации, а также тем, какое место занимает оператор в иерархической системе управления большой системой.

Как известно, в большой системе может быть много иерархических ступеней, каждая из которых характеризуется объемом управляемого оборудования — степенью централизации управления и взаимосвязанными с другими ступенями. Степень централизации определяет, в частности, меру подробности отображения различных агрегатов и объектов в процессе оперативного управления ими. Так, например, для машиниста турбогенератора важно знать множество параметров агрегата; по мере перехода к более высоким ступеням — оператору блока, дежурному инженеру станции, диспетчеру энергетического района число отображенных параметров турбогенератора будет неуклонно уменьшаться, и на какой-то ступени он уже вообще не будет рассматриваться как самостоятельный управляемый объект, а войдет в символ станции, в показатель ее состояния — общую мощность. В связи с этим можно ставить вопрос об оперативных единицах управления как комплексных показателях уровня централизации управления на каждой ступени большой системы.

В расчетах оптимальных коэффициентов иерархии [63] до сих пор недостаточно учитываются психофизиологические возможности человека по одновременному управлению большим числом объектов, а также влияние конструкции СОИ и пультов управления на деятельность операторов.

Можно считать, что низшие ступени в иерархической системе управления соответствуют операторским профессиям, а более высокие — диспетчерским. Основное различие между ними состоит в том, что среди функций оператора большое место занимают слежение за состоянием параметров объекта и их аналоговое регулирование, пооперационные пуск, остановка, смена режимов работы, объекта, контроль за исправностью технологического оборудования и средств автоматизации. Причем характерно, что между оператором и управляемыми объектами обычно нет людей-посредников: оператор осуществляет прямое (хотя и дистанционное) воздействие на исполнительные механизмы объекта. Диспетчер же воздействует на объекты, как правило, через оперативно подчиненных ему людей (операторов или диспетчеров низших рангов), осуществляя планирование и координацию их работы, указывая новые требуемые значения выходных параметров объектов, но не

влияя на их промежуточные значения при смене режимов. Таким образом, на уровне диспетчерского управления осуществляется дискретное изменение режимов работы управляемых объектов.

Основными оперативными единицами управления для оператора являются отдельные, в том числе промежуточные, технологические параметры управляемых объектов, а для диспетчера — целиком управляемые объекты, состояние которых характеризуется незначительным числом выходных параметров.

Очевидно, что строгой границы между операторским и диспетчерским трудом провести нельзя. Почти в любой системе оператор наряду с чисто операторскими функциями может выполнять и диспетчерские, например, отдавать распоряжения местному обслуживающему персоналу (обходчикам, дежурным машинистам у агрегатов и т. п.), изменять (дискретно) установки аналоговых автоматических регуляторов, включать пусковые и защитные программные автоматы и т. д. С другой стороны, диспетчеры, как правило, имеют некоторые объекты в своем непосредственном оперативном управлении.

Однако на практике в каждом случае, учитывая преобладание тех или иных функций, можно достаточно уверенно отнести рассматриваемый вид деятельности к операторской или диспетчерской профессии. В иерархических системах управления это может быть сделано по чисто формальному признаку: на низшей ступени находятся операторы, на более высоких — диспетчеры. Обе эти профессии имеют очень много общего в своей сущности, основах организации труда, психологической структуре. Их принято относить к операторским в широком смысле. В дальнейшем мы будем упоминать операторов, имея в виду применимость тех или иных положений и к диспетчерам, специально оговариваясь в случаях, когда такая общность по каким-либо причинам нарушается.

3

Проблема взаимосвязи структуры систем отображения информации и сложности оперативных задач

Одним из важнейших показателей деятельности человека-оператора является время решения возникающих задач, связанных обычно в АСУ ТП с ликвидацией нарушений технологического режима, отклонением параметров работы объекта от заданных значений. Решение здесь понимается расширенно, в него включаются процессы восприятия информации, оценки обстановки (диагностирования ситуации с получением дополнительной необходимой информации), собственно мыслитель-

ные процессы решения, планирование его реализации и контроль результатов. Как указывает ряд авторов, увеличение скорости протекания этого сложного психического процесса не может быть достигнуто лишь за счет увеличения темпа каждой из указанных составляющих процесса решения. Необходима перестройка структуры всей психической деятельности человека. Функционально-генетические исследования [53] показали, что такая перестройка возможна. Исследование путей методов целенаправленной перестройки сенсорных и мыслительных процессов является не только первоочередной инженерно-психологической проблемой, но и представляет общепсихологический интерес.

Применительно к деятельности человека в системах управления изучение этой проблемы тормозится, в частности, из-за отсутствия классификации видов реальных оперативных задач, методов анализа их сложности. Необходимо разработать методику количественной оценки сложности оперативных задач и определения степени адекватности информационной модели этим задачам.

Анализ литературных данных показывает, что результаты психологических исследований процессов решения задач, в которых структура этих процессов представляется в виде древовидных графов [1, 39, 54] или алгоритмических цепей [54], невозможно использовать для перестройки протекания процессов решения с целью повышения их эффективности путем подбора адекватной структуры информационной модели.

На наш взгляд, причина состоит в следующем. Поскольку перестройка психических процессов, как отмечалось выше, носит не поэтапный, а целостный характер, то при переходе от одной информационной модели к другой (при постоянном составе информации) изменяется вся структура решения, причем в зависимости от уровня обученности испытуемого и его индивидуальных особенностей перестройка для одних и тех же задач будет различна. Следовательно, структура решения отличается многовариантностью, практически очень сложно выявляется, но даже если ее удается выявить, то сопоставление, скажем, древовидных графов не позволяет выявить зависимость эффективности решения от структуры информационной модели.

Многовариантность структуры решения говорит о необходимости дополнить детерминистские способы ее описания вероятностными. Возникает необходимость исследования связей между факторами, статистически обусловливающими эффективность решения задач, и структурой информационных моделей.

Правильное решение вопроса о природе трудности мыслительных задач, как указывает А. Р. Лурия [80], было бы очень большим вкладом в психологию мышления. Исследованию отдельных факторов, определяющих объективную трудность мыслительных задач разных типов, включенных в разные виды деятельности, посвящен ряд исследований.

В противовес подходу к оценке сложности задач методом тривиального подсчета «количества перерабатываемой информации» О. К. Тихомиров [117] предложил многоплановую и, частично, количественную характеристику условий мыслительной задачи, включающую такие факторы, как состав и число альтернативных изменений ситуации; число преобразований ситуации в ходе решения задачи; единственность или множественность решения; объективное значение и ценность ситуации и различных ее преобразований.

На процесс информационного поиска [6], являющегося важным этапом сенсорной деятельности при решении задач и включающего в себя операции обнаружения объекта восприятия, выделение его основных, с точки зрения возникающей задачи, признаков и опознавание объекта, влияют [61]: общий объем отображения (число элементов в информационном поле); оперативный объем отображения (число элементов, относящихся к решаемой задаче); структура информационного поля; плотность элементов. При этом выявлено увеличение дисперсии времени информационного поиска при увеличении общего объема отображения. Однако в этом исследовании не моделировались мыслительные оперативные задачи, поэтому полученные зависимости являются относительно частными и не отражают всего процесса решения оперативных задач.

Изучая процессы формирования оперативных единиц памяти на модели деятельности оператора, связанной с задачей упорядочивания объектов (выстраиванием их в очередь для обслуживания), Г. В. Репкина [102] показала, что время, затрачиваемое оператором на решение этой задачи, зависит от числа упорядочиваемых объектов и числа характеристик (параметров) у каждого из них (коэффициент корреляции 0,97). В ходе тренировок укрупняются оперативные единицы восприятия и памяти, что облегчает и повышает эффективность сенсорных и мыслительных процессов (восприятие и запоминание ведется не по «слогам», а «словами» и «фразами»).

Оперативную единицу восприятия (ОЕВ) В. П. Зинченко определяет как компактное, семантически целостное образование, формирующееся в результате перцептивного обучения и создающее возможность практически одномоментного целостного восприятия внешней ситуации независимо от числа содержащихся в ней признаков. Как показывает анализ действий испытуемых и операторов при работе с мнемосхемами, в зависимости от характера задачи роль ОЕВ может играть единичный символ (параметр, орган управления, участок технологической линии), технологический агрегат (подогреватель, насос), технологический блок (группа подогревателей или насосов).

На зрительное опознание информационных элементов [59] влияют: угловые размеры элементов (букв, цифр, знаков и т. п.), световые характеристики (освещенность, яркость, контраст яркости), цветовой фон и цветовые контрасты, временные характеристики.

На скорость оценки и переработки информации влияют следующие основные факторы: способ кодирования, степень сложности информационной модели, структура связей элементов информационной модели, динамика информации.

Время принятия решения определяется типом задачи, ее проблемностью, количеством и сложностью условий, структурой алгоритма решения, возможностью контроля решения.

Скорость исполнительной деятельности оператора зависит от числа органов управления, их типов, способа размещения, характеристик, определяющих степень удобства работы с каждым отдельным органом управления (размер, форма, сила сопротивления и т. д.), совместимость двигательных операций, выполняемых одновременно и последовательно, логики связи моторных действий с отображаемой информацией.

Существует группа факторов, оказывающих влияние на деятельность оператора на всех фазах и прежде всего на самых напряженных и трудоемких. Это компоновка рабочего места, форма пульта, конструкция кресла, характеристики окружающей среды (шум, вибрация и др.), особенности взаимодействия операторов в иерархической системе управления.

Наряду с перечисленными выше объективными характеристиками имеется группа субъективных факторов, обусловливающих различия в скорости,

точности и надежности деятельности операторов. К ним относятся индивидуальные психические особенности операторов, функциональное состояние оператора во время работы (надежность, утомление и др.), опыт и тренированность, отношение к выполняемым обязанностям (мотивация).

Условимся называть одну оперативную задачу сложнее другой, если математическое ожидание[1] величины некоторого критерия эффективности решения первой задачи для данной группы испытуемых (операторов) хуже, чем второй задачи. В качестве критериев в зависимости от специфики системы управления можно взять время решения (t), число допущенных ошибок (ξ), их произведение (z) и т. д.

С помощью среднего значения критерия, скажем $\bar{z} = \overline{t\xi}$, можно сравнивать уровень сложности решения разных задач одними и теми же испытуемыми по одной и той же информационной модели. В этом случае различия в величине $\bar{z}_1 > \bar{z}_2$, очевидно, должны быть обусловлены факторами сложности первой и второй задач. Причем выбранная совокупность факторов должна оцениваться по тесноте множественной статистической связи (например, по коэффициенту множественной корреляции) с критерием. Известны случаи, когда в психологических исследованиях произвольно выбирался один-два фактора, например, число «символов» (фигур на шахматной доске) и формально возможных вариантов решения. Недостаточное число выбранных факторов и неконтролируемые различия в структуре решения задач, естественно, приводили к парадоксальным выводам, например, о том, что число элементов ситуации не является фактором, обусловливающим сложность решения задачи, в то время как влияние этого фактора перекрывалось изменениями других, не контролировавшихся в опытах [118].

Различие в величине критерия сложности может использоваться для сравнения не только сложности оперативных задач, но и уровня сложности процессов решения одних и тех же задач одними и теми же испытуемыми, но по разным вариантам средств отображения информации об управляемом объекте. В этом случае различия в величине $\bar{z}_А > \bar{z}_Б$ отражают относительную приспособленность вариантов $А$ и $Б$ средства отображения для решения выбранного круга оперативных задач.

Наконец, значение критерия z различно для разных испытуемых. Если $\bar{z}$ — среднее значение критерия по всей группе, то можно выделить испытуемых, для которых решение данных задач по данному типу средства отображения более (или менее) сложно, чем в среднем для всей группы.

---

[1] Средние величины принимаются для нормального закона распределения критериев. В произвольном случае необходимо сравнивать вероятностные характеристики.

Если выбрать некоторое максимально допустимое значение критерия (чаще всего t_{max} или z_{max}), то испытуемые (операторы) с худшим значением критерия, чем t_{max} или z_{max}, считаются не соответствующими требованиям управления данным объектом и от дальнейшего участия в экспериментах или в работе отстраняются. В экспериментах может использоваться прием, когда показатели работы испытуемых в разных условиях (например, с разными вариантами средств отображения) сравниваются, когда уровень их обученности (т. е. значение критериев, например t и ξ) ближе всего к среднему уровню обученности операторов реального объекта. Это соображение будет использовано нами в дальнейшем в качестве основы при планировании некоторых экспериментов по сравнительной оценке вариантов СОИ.

Остановимся на вопросе сравнения величин критериев сложности решения, скажем, первого и второго типов задач по вариантам *А* и *Б* средства отображения одной и той же группой испытуемых.

Многочисленные эксперименты [13, 14, 17, 21] позволяют сделать выводы о статистической достоверности различий величин критериев (например, t и ξ) для разных типов задач и вариантов СОИ. Допустим, экспериментально получены следующие соотношения:

$$\bar{t}_{1А} > \bar{t}_{2А}; \quad \bar{t}_{1Б} > \bar{t}_{2Б}; \quad \bar{t}_{1А} > \bar{t}_{1Б}; \quad \bar{t}_{2А} > \bar{t}_{2Б},$$

где $\bar{t}_{1А}$ — среднее время решения 1-го типа задач по варианту *А*, $\bar{t}_{1Б}$ — по варианту Б;

$\bar{t}_{2А}$ — среднее время решения 2-го типа задач по варианту *А*; $t_{2Б}$ — по варианту *Б*.

Отсюда следует вывод, что если нами выявлен достаточно полный набор факторов, обусловливающих сложность различных задач, то количественные значения этих факторов должны изменяться при переходе от решения этих задач по варианту *А* к варианту *Б* СОИ.

Если этот вывод верен, то можно предположить, что каждая оперативная задача характеризуется некоторой присущей ей совокупностью количественных значений факторов сложности, определяемой объективной реальностью на самом объекте — числом единичных элементов объекта и связей между ними, числом физико-технологически (и, следовательно) семантически целостных групп элементов, по которым может просматриваться общее состояние объекта, и т. д. Такие «идеальные» значения факторов могут быть получены из анализа оптимальных способов решения задач при выбранном составе информации об объекте. Любое реальное СОИ как бы вносит шумы в систему, навязывая операторам некоторые отступления от идеальной стратегии действия при решении конкретной задачи.

Проведенный нами тщательный анализ хода решения многочисленных оперативных задач разными испытуемыми в лаборатории и операторами на объектах с различными типами СОИ показал, что, несмотря на индивидуальные различия между людьми, в среднем обнаруживается определенная тенденция в отклонении хода решения оперативных задач от оптимального в зависимости от способа отображения информации. Эта тенденция тем более явна, чем большая доля необходимой для решения задачи информации отображается непосредственно на СОИ. Наоборот, увеличение доли априорной информации (как бы скрытой за панелью СОИ, касающейся неотраженной физики объекта, которую оператор должен представлять мысленно) делает эту тенденцию менее заметной. Роль СОИ, различия между их вариантами выявляются в последнем случае с большим трудом. Это подтвердилось особенно четко при исследовании процессов решения задач диспетчерами объединенной энергосистемы Урала (см. гл. 3, п. 10).

Для исследования влияния структуры СОИ на структуру процесса решения оперативных задач более удобна мнемосхема единичного автономного технологического объекта.

Экспериментальные исследования показывают, что в большинстве случаев факторы сложности оперативных задач имеют реальные средние значения, превышающие их минимальное, теоретическое значение, рассчитанное из оптимальных алгоритмов решения этих задач. Например, наряду с элементами и связями, непосредственно относящимися к определенной задаче, испытуемые дополнительно включали в процесс решения посторонние элементы, как оказалось, затемняющие на мнемосхеме актуальные (непосредственно относящиеся к задаче) технологические элементы и контуры. Такая наглядная связь на мнемосхеме актуальных и посторонних информационных элементов, трудность в их разделении приводят к тому, что реальное среднее значение факторов, обусловливающих сложность решения задач, больше минимального («идеального») и зависит от конкретного способа отображения информации.

Таким образом, проблема рационализации структуры информационной модели трактуется нами как исследование и преобразование взаимосвязей между структурой информационной модели и сложностью оперативных задач, направленные на приближение реальных значений факторов сложности оперативных задач по данному СОИ к их теоретически оптимальным значениям. При этом должны быть выявлены и изучены психологические факторы, количественно определяемые характеристиками СОИ и статистически обусловливающие сложность решения оперативных задач. Это позволит целенаправленно отыскивать способы рационального построения СОИ, снижающие реальные значения этих факторов, и тем самым повышать эффективность деятельности операторов.

Проблема в целом сложна и многогранна. Наша задача состоит в исследовании этой проблемы на примере деятельности операторов автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). В качестве СОИ в основном рассматриваются широко распространенные в АСУ ТП графические оперативно-информационные модели, реализованные в виде мнемосхем.

Наряду с общей проблемой следует отметить ряд составляющих ее основных конкретных задач.

В частности, необходимо провести психологический анализ деятельности операторов АСУ ТП, выбрать типичные оперативные задачи, экспериментально исследовать процессы их решения, выявить статистическую зависимость психологических факторов сложности задач от способов представления информации о состоянии управляемого объекта, учитывая в необходимых случаях его структуру, динамические свойства, плотность потока сигналов во времени и другие объективные условия деятельности человека-оператора.

Для этого необходимо разработать и применить комплекс методических приемов воспроизведения в психологическом эксперименте процессов решения реальных оперативных задач для обеспечения возможности переноса результатов психологических исследований в практику проектирования СОИ. На основе анализа факторов сложности оперативных задач и данных экспериментальных исследований могут быть разработаны общие принципы компоновки элементов СОИ.

Предполагается разработать и экспериментально сравнить основные принципы разделения интегральной и детальной информации на мнемосхемах, а также исследовать влияние зрительного выделения на мнемосхеме актуальных технологических контуров на реальные значения факторов сложности оперативных задач и эффективность их решения человеком-оператором.

В связи с проблемой регулирования интенсивности поступления информации к человеку-оператору необходимо исследовать экспериментально влияние объема представляемой информации на эффективность и сдвиги психофизиологических показателей напряженности деятельности (с полиэффекторной регистрацией электрокардиограммы, электроокулограммы, кожно-гальванической реакции, основных ритмов электроэнцефалограммы и др.), а также изучить комплексное влияние объема представляемой информации и факторов внешней среды на деятельность человека-оператора и на основе этих данных сформулировать перспективные задачи комплексного экспериментального изучения деятельности в эргономике.

В связи с выдвинутым предположением о том, что детальная истинная интерпретация оператором поступающей информации не всегда является необходимым условием деятельности, предполагается исследовать возможность повышения эффектив-

ности деятельности операторов некоторых систем путем сокращения объема передаваемой человеку конкретной физико-технологической информации, а затем разработать и оценить экспериментально примеры СОИ нового, условно-абстрактного типа.

Важную задачу составляет разработка методических принципов планирования и постановки психологических экспериментов, связанных со сравнительной оценкой вариантов мнемосхем.

Практическая эффективность результатов проведенных исследований должна быть доказана путем их внедрения в художественно-конструкторские проекты мнемосхем ряда крупных АСУ ТП, широко различающихся по функциям операторов и типам применяемых средств автоматизации и вычислительной техники, с последующим анализом работы систем и деятельности операторов с созданными СОИ и оценкой технико-экономического эффекта от внедрения результатов исследований.

Глава

2

Экспериментальное исследование процессов решения оперативных задач по мнемосхеме

4

Описание управляемого объекта и экспериментальных задач

Основу структурно-психологического метода анализа и синтеза многокомпонентных систем отображения информации составляет изложенная выше вероятностная концепция взаимосвязи между структурой оперативно-информационной модели и оперативно-психической моделью объекта. Как важный этап разработки структурно-психологического метода исследовалась зависимость процессов решения оперативных задач и значений факторов их сложности от структуры СОИ. В качестве примера многокомпонентного СОИ использовалась мнемосхема.

Испытуемые решали в ходе экспериментов оперативные задачи, связанные с управлением автономным узлом тепловой электростанции — блоком сетевых подогревателей (БСП). Мнемосхема БСП, повторяющая соответствующую часть мнемосхемы блока ТЭЦ-21 Мосэнерго, показана на рис. 2.

БСП служит для подогрева и повышения давления сетевой воды. Подогрев осуществляется в одном подогревателе первой ступени (с задвижками на магистралях воды *60* и *61* и пара — *95* *) и двух подогревателях второй ступени (с задвижками *62*, *63*, *93* и *64*, *65*, *96* соответственно).

Давление воды повышается посредством подъемных *033*, *034* и сетевых *037*, *038*, *039* насосов.

Эжектор *82* служит для предпусковой заливки подъемных насосов.

Конденсат греющего пара отводится из подогревателей второй ступени конденсатным насосом *059* или сливается самотеком в подогреватель первой

* Нумерация мнемоэлементов соответствует мнемосхеме энергоблока ТЭЦ-21 Мосэнерго.

ступени (при открытой задвижке *88*), откуда откачивается насосами *035* и *036* или аварийно сбрасывается через задвижку *83*.

Символами с номерами *288*, *294* и *302* обозначены точки контроля давления воды (мнемосимволы параметра «давление»); точка контроля температуры обозначена символом с номером *301*; точки контроля уровня конденсата в подогревателях обозначены символами с номерами *291*, *296*, *297*.

Основная цель оператора при управлении БСП — поддержание значений выходных параметров на заданном уровне, в частности, при различных возмущениях — изменении температуры обратной сетевой воды и греющего пара, внезапных отключениях насосов, поломках оборудования и т. д.

Все элементы контроля и управления — органы управления (прямоугольные символы) и параметры (давление, уровень, температура) пронумерованы в соответствии с избирательными системами управления и контроля, примененными на ТЭЦ-21. Принципы кодирования на мнемосхеме органов управления и технологических параметров объекта подробно сообщались испытуемым. Усвоение ими символики проверялось особо.

Эти принципы, а также результаты экспериментов, направленных на поиск оптимальных способов кодирования элементов мнемосхемы, изложены в гл. 10, п. 26.

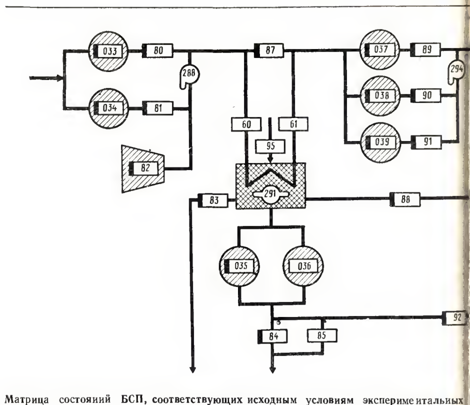
Оперативные задачи для данного исследования подбирались из задач, выявленных при анализе деятельности операторов реального объекта с таким расчетом, чтобы они различались количественными характеристиками факторов, оказывающих влияние на процессы информационного поиска [6, 59], таких как соотношение общего и оперативного объема информации (общего числа элементов контроля и управления на мнемосхеме и числа этих элементов, относящихся к задаче), т. е. коэффициент избыточности информации, а также структура наиболее значимой для данной задачи части мнемосхемы, концентрация в ней информационных элементов, необходимость их упорядочения (выстраивания в очередь для обслуживания), а также внутренней перегруппировки в процессе решения.

Поскольку в основной серии опытов испытуемым предъявлялась одна и та же мнемосхема (но с разными состояниями органов управления, т. е. при различных состояниях объекта), то оставались неизменными существенные для информационного поиска факторы — структура информационного поля, плотность и расположение элементов [59].

Для удобства проведения количественного анализа связей между всеми параметрами, органами управления и состоянием агрегатов в ходе оперативного управления объектом (решения оперативных задач) мы применили метод структурных схем, разработанный в теории автоматического регулирования.

На рис. 3 представлена структурная схема БСП как объекта управления. На схеме сплошными линиями обозначены прямые, наиболее сильные связи (передаточные функции «выход—вход» с большими коэффициентами усиления и малыми постоянными времени). Например, давление (P_{288}, P_{294} и P_{302}) зависит прежде всего от состояния насосов *033* и *034*, а также *037*, *038*, *039*; температура t_{301} — от положения паровых задвижек *95*, *93* и *96*.

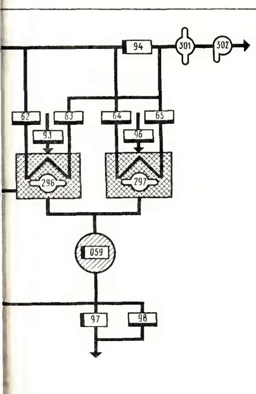
Штриховыми линиями обозначены косвенные связи. Например, включение насоса *038* повышает давление (прямое положительное влияние), но одновременно, при прочих постоянных условиях, понижает температуру воды (косвенное отрицательное влияние). Пунктирными линиями обозна-



Матрица состояиий БСП, соответствующих исходным условиям эксперимеитальиых

№ задач	Состояиие контролируемых параметров																		
	P_{288}	P_{294}	P_{302}	t_{301}	H_{291}	H_{296}	H_{297}	*033*	*80*	*034*	*81*	*82*	*87*	*60*	*61*	*95*	*83*	*035*	*036*
1	00	00	00	00	00	00	00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	11	11	11	01	11	11	11	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0
3	11	11	11	11	11	10	10	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0
4	11	01	01	01	11	11	11	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0
5	11	11	11	11	11	11	11	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
6	11	11	01	01	11	11	11	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0
7	11	01	01	11	11	11	11	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0
8	11	11	11	10	11	11	11	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0
11	11	11	11	11	11	01	01	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0
12	11	11	01	11	11	11	11	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0
14	10	10	10	10	11	11	11	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0

чены иестаидартные влияиия и аварийные возмущения. Например, быстро сиизить температуру t_{301} можно, открыв задвижки *87*, *94* (тем самым шуитируются подогреватели), ио это иестаидартиое влияиие, так как эти задвижки ие предиазиачеиы для воздействия иа температуру. Или, иапример,



2 *Мнемосхема блока сетевых подогревателей ТЭЦ-21 Мосэнерго*

Таблица 1

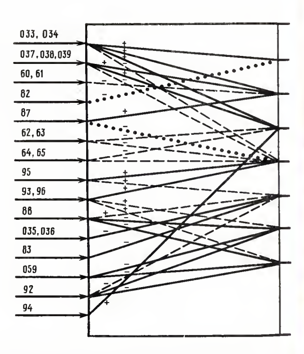
задач

Положение органов управления																			
84	85	037	89	038	90	039	91	88	62	63	93	64	65	96	94	92	059	97	98
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0

при работающих насосах давление P_{302} может быть мало из-за разрывов труб и утечки воды в одном из подогревателей. Испытуемым предварительно сообщались только прямые связи. Косвенные и нестандартные влияния должны были отыскиваться самостоятельно в ходе решения задач.

5*

3 *Структурная схема БСП как объекта управления (сплошные линии — прямые связи; штриховые — косвенные; пунктирные — нестандартные)*



Для успешного решения достаточно сложных экспериментальных задач испытуемые подбирались особо. Всего в опытах участвовали 6 опытных инженеров в возрасте 30—35 лет, хорошо разбирающнхся в подобных функционально-технологических схемах; однн из них — опытный оператор тепловой электростанции.

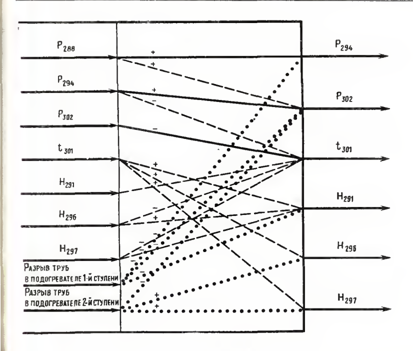
После предварительной серии опытов было оставлено для основной серии 2 испытуемых, наиболее глубоко усвоивших приемы оперативного управления данным объектом в тренировочной серии, а также введены опытный оператор и один новый испытуемый, не участвовавший в предварительных опытах.

Из 16 задач, опробованных в предварительной серии, в основной серии использовалось 11 задач (сохранена их исходная нумерация: 1—8, 11, 12 14).

В табл. 1 приведена матрица исходных состояний БСП, отраженных на цветных диапозитивах (в предварительной серии) нли плакатах мнемосхемы объекта.

Параметры могут находиться на «нулевом» уровне (при отключенном БСП), это их значение обозначено через 00, в норме — 11, отклонены от заданного значения либо вниз — 01, либо вверх — 10. Орган управления (задвижка) может быть либо открыт (обозначение 1), либо закрыт (0). Таким образом, удалось найти матричную форму записи, более компактную, чем алгоритмическая, которая была разработана на более ранних этапах наших исследований [21].

Испытуемому устно сообщалось задание (условие задачи), которое совместно с состоянием объекта, отображенным на мнемосхеме, служило исходной основой для оценки ситуации н принятия решения относительно изменения положення органов управления для нормализации режима работы объекта.



5 Анализ соотношения структуры мнемосхемы и количественных значений психологических факторов сложности оперативных задач

Рассмотренный в гл. 1, п. 3 перечень факторов, влияющих на показатели деятельности операторов, составленный по литературным данным [59], хотя и не является достаточно полным для характеристики сложности реальных оперативных задач, тем не менее результаты психологических исследований этого направления могут быть взяты за основу при дальнейшем изучении этого вопроса применительно к решению оперативных задач с опорой на графическую информационную модель типа мнемосхемы.

С целью выявления психологического анализа и количественной оценки основных факторов, статистически обусловливающих сложность решения оперативных задач в зависимости от структуры СОИ и достаточно устойчивые различия в показателях решения задач (времени, числа ошибок и др.), была проведена специальная серия экспериментов.

Методические особенности этой серии состояли в следующем:

1. Использовался большой набор оперативных задач (20.)

2. В большей части экспериментов условия задачи сообщались при экспонированной мнемосхеме, в остальных — до включения диапроектора (мнемосхема в этой серии предъявлялась методом проецирования на экран с угловыми размерами 30×20°).

3. Регистрация движений глаз, отдельно вертикальной и горизонтальной составляющих, осуществлялась на четырехканальном электроэнцефалографе (без интегратора импульсов).

4. В большей части опытов испытуемые проговаривали весь ход решения Экспериментатор, находившийся в этом же помещении, иногда задавал вопросы по ходу решения. Опрос проводился иногда при прерывании решения, после решения очередной задачи и наиболее обстоятельный — после эксперимента. Интервью фиксировалось на магнитофонной ленте.

5. В ряде экспериментов мы требовали от испытуемых с помощью указки демонстрировать все прослеживаемые ими контуры и включаемые в решение задачи информационные элементы. Это делалось с целью запрета «отстройки» от мнемосхемы и беспрограммного осмотра ситуации, который, по К. Дункеру, является часто необходимым при решении проблемных задач.

6. В экспериментах важно было «привязать» взгляд испытуемого к реперным точкам мнемосхемы. Для этого требовалось заменить процесс распознавания, при котором испытуемый не фиксирует точки и не обводит глазами контур мнемосхемы, процессом различения. Это достигнуто путем применения мнемосимволов параметров и органов управления с номерами и сигналами положения, считывание которых достаточно затруднено (угловой размер цифр по высоте 12′). Знакомясь с ситуацией на мнемосхеме в целом, испытуемый мог пользоваться оперативными единицами восприятия, но при детальном анализе он вынужден был фиксировать взглядом каждый информационный элемент, имеющий, с его точки зрения, отношение к возникшей оперативной задаче, с тем чтобы прочесть его номер и установить положение органа управления.

7. Наряду с полной мнемосхемой БСП (см. рис. 2) испытуемым предъявлялись сменные мнемосхемы, отображающие только контуры БСП, непосредственно относящиеся к данной задаче.

8. В ходе предварительной серии опытов делались попытки предлагать испытуемым прорисовывать ход решения задач, преобразуя мнемосхему БСП в удобную для испытуемого форму.

Предварительная серия опытов была направлена на отработку методики основных экспериментов, качественный анализ процесса решения задач, выявление основных фаз решения и объективных факторов, влияющих на процесс решения.

Уточненная методика, по которой были продолжены эксперименты, изложена в следующем разделе.

Анализ электроокулограмм показал, что в ходе решения задач присутствовали все фазы, ранее выявленные в исследованиях В. П. Зинченко и Н. Ю. Вергилеса [58], однако оказалось, что их число, порядок следования и повторения фазовых циклов варьируют в очень широких пределах. Это объясняется многовариантностью самой структуры решения в зависимости от уровня обученности испытуемых, знания ими приема или даже конкретного алгоритма решения возникшей задачи, а также от индивидуальных различий между испытуемыми.

Операционно-психологический анализ сенсорной и мыслительной деятельности испытуемых, основанный на регистрации их глазодвигательного поведения, исследовании структуры объекта и оперативных задач, комментариях испытуемых по

ходу решения задач, а также на данных их опроса, показал, что в разных случаях решение задач может включать в себя в различных сочетаниях следующие операции, которые разбиты на группы, соответствующие основным этапам работы испытуемых в эксперименте.

Этап 1. Работа до предъявления мнемосхемы (период от начала изложения испытуемому условий задачи до предъявления мнемосхемы):

а. Уяснение и запоминание задания. Это основная, постоянная операция первого этапа. Если до предъявления мнемосхемы испытуемый уяснил задание и еще осталось некоторое время (это время варьировало в предварительной серии), то испытуемым могут быть выполнены еще некоторые операции, в том числе:

б. Представление общей функционально-оперативной структуры ситуации на объекте.

в. Представление параметров, органов управления и актуальных контуров мнемосхемы объекта, непосредственно относящихся к поставленной задаче.

г. Мысленное выделение критичных по отношению к задаче элементов мнемосхемы.

д. Мысленное прослеживание связей между элементами мнемосхемы, относящимися к задаче.

Эксперименты, проведенные нами совместно с А. А. Митькиным [24], в которых хорошо обученные испытуемые часть задачи решали по представляемой мнемосхеме, показали, что при этом маршрут движений глаз, хотя он весьма редуцирован, сходен с фазой ознакомления с ситуацией в условиях предъявляемой мнемосхемы.

е. Формирование концептуальной модели ситуации и предварительный выбор основного приема решения задачи.

В некоторых случаях испытуемые по памяти формировали полный алгоритм решения задачи и алгоритм его реализации.

На этом этапе могла быть выявлена проблемная ситуация и выработана установка на решение в дальнейшем проблемной задачи. В некоторых случаях испытуемые, напротив, пытались ошибочно применить известный прием решения к проблемной задаче, сформировав не адекватную ситуации оперативно-психологическую модель объекта.

Вообще было выявлено, что число успешных операций этого этапа было тем больше, чем меньше элементов объекта (оперативных единиц памяти) включалось в задачу, чем проще была структура взаимосвязей между ними.

Этап 2. Ознакомление с ситуацией в условиях восприятия мнемосхемы:

а. Поиск и опознание отклонившихся параметров.

б. Зрительное выделение элементов мнемосхемы (отдельных и группами — по оперативным единицам восприятия), непосредственно относящихся к задаче, и контроль их состояния.

в. Прослеживание актуальных (главных) контуров объекта.

г. Отнесение ситуации к определенному (известному) классу состояний объекта.

д. Визуализация требуемого конечного состояния объекта и ступеней последовательных преобразований исходной ситуации для его достижения с учетом прямых взаимосвязей между элементами объекта, включенными в задачу, а также косвенных и нестандартных связей, которые могут вызывать «побочные» эффекты при реализации решения данной задачи и вызывать дополнительные нарушения состояния объекта — отклонения других параметров и таким образом возникновение новых оперативных задач.

Опрос испытуемых относительно их действий на этом этапе показал, что большинство из них в ходе решения сложных задач, не полностью информационно определенных на мнемосхеме, получив от нее ту полезную информацию, которая на ней отражена, стараются «отстроиться» от мнемосхемы, с тем чтобы визуализировать (образно представить) структуру объекта, более адекватно отображающую полные данные, необходимые для решения задачи.

Один из испытуемых после опыта на вопрос: «Бывает ли необходимость отвлечься от той мнемосхемы, которая у вас перед глазами?» — ответил: — «Несомненно, в тех случаях, когда возникает сложная, ранее не встречавшаяся задача, я внимательно просматриваю мнемосхему, и если не удается найти по ней решение, стараюсь отвлечься от мнемосхемы, стараюсь не видеть ее. Это помогает оперировать наиболее существенным для данной задачи, иногда вникнуть в существо внутренних физических связей между элементами объекта, не выраженных или не явно выраженных в мнемосхеме».

Другой испытуемый так описал ход решения им задачи: «Сначала ознакомился по мнемосхеме с ситуацией, уточнил, какие параметры отклонились и каковы возможные причины. Для этого проследил, но не по линиям и элементам, а в общем, целыми агрегатами, каково их состояние и что может влиять на эти параметры. Например, я не смотрел, в каком положении каждый орган управления около подогревателей, я смотрел в целом — включен или отключен подогреватель, в работе он или выведен из схемы. Потом, когда я увидел, что из представленной на схеме структуры объекта данное нарушение — падение давления на выходе — не следует, я понял, что причины не отражены явно на самой мнемосхеме, они где-то в физике объекта. Здесь я уже отошел от мнемосхемы — она мне не так помогала, как, впрочем, и не мешала, ведь эта схема помогает связывать разные данные, так что все равно я изредка к ней обращался; но более полные условия задачи были уже у меня в голове». На электроокулограмме были зарегистрированы длительные периоды почти полной остановки глаз.

В связи с тем, что почти все испытуемые говорили о том, что на мнемосхеме с точки зрения каждой задачи есть лишние, отвлекающие элементы, в предварительную серию было включено решение задач по сменным мнемосхемам. На них отображался только актуальный контур со всеми элементами, соответствующими условию данной задачи. Как и ожидалось, решение задач находилось испытуемыми непосредственно на самой мнемосхеме. Депрессия глазодвигательной активности в этом случае не наблюдалась.

Тогда был поставлен другой вопрос: как будет протекать процесс решения задач по полной мнемосхеме, когда на ней отображается «лишняя» для данной задачи информация. Но в то же время для решения необходимо вникнуть в скрытую физическую структуру объекта, не отображенную на мнемосхеме? Во время опытов испытуемым давалась в руки указка, с помощью которой они иногда должны были прослеживать интересующие их контуры мнемосхемы, а иногда и комментировать вслух ход решения. Тем самым «отход» от мнемосхемы был затруднен. Депрессия глазодвигательной активности в этих случаях также не наблюдалась, но характерно то, что резко уменьшилось относительное число правильных решений подобных проблемных задач, зато одновременно сократилось число ошибок из-за пропусков элементов при решении обычных задач с известными приемами решения.

В дальнейшем, в основной серии, были отменены комментарии испытуемых по ходу решения, не использовались сменные мнемосхемы, указка, а также было максимально сокращено время на изложение условий задачи (до предъявления мнемосхемы), чтобы исключить этап решения по представляемой мнемосхеме и иметь более полную картину глазодвигательного

поведения испытуемых в процессе решения оперативных задач при отображении объекта на мнемосхеме.

При выявлении психологических факторов, в совокупности достаточно полно статистически учитывающих влияние структуры мнемосхемы на сложность решения оперативных задач, к ним предъявлялись следующие требования:

1. Повторяемость, количественная измеримость и статистическая достоверность значений.

2. Зависимость реальных значений факторов от структуры информационной модели.

3. Возможность определения реальных количественных значений факторов с помощью хорошо разработанных психологических методов: на основе регистрации действий при принятии и реализации решений, с помощью опроса и самоотчета испытуемых (операторов), при проговаривании ими хода решения («думании вслух»), путем анализа запросов дополнительной информации и переговоров с другими операторами в процессе решения.

Необходимо заметить, что указанные психологические методы эффективны при изучении процессов решения оперативных задач, поскольку, как показали длительные наблюдения за деятельностью операторов многих АСУ ТП, в силу высокой ответственности принятие ими решений за редким исключением носит осознанный логический характер и они обычно готовы обстоятельно мотивировать принятое ими решение. Это облегчает (например, по сравнению с изучением шахматной игры) выявление хода решения и особенно материала, включенного в него (элементов объекта, связей между ними и т. д.).

Простота используемых в данном случае психологических методов важна для их дальнейшего широкого практического распространения в организациях, ведущих проектирование и художественное конструирование средств отображения информации.

4. Исследование влияния факторов на сложность задач с помощью существующих методов статистического анализа и выявление оптимальных количественных значений факторов известными методами теории автоматического управления или по данным решения задач опытными операторами.

5. Положительная статистическая связь каждого фактора с критерием сложности задач.

6. Высокий коэффициент множественной корреляции выбранного критерия по совокупности факторов.

7. Предпочтение должно отдаваться наиболее общим, универсальным факторам, в особенности тем, которые уже длительно апробировались в различных психологических исследованиях структуры мыслительных процессов [117], информационного поиска [6] и др.

8. Возможность нахождения конкретных путей рационализации структуры информационных моделей на основе

анализа статистических связей факторов и критериев сложности оперативных задач.

Теперь перейдем к перечню выявленных факторов (K_j), обусловливающих сложность оперативных задач, и методике определения их теоретического ($K_{j\text{Т}}$) и реального ($K_{j\text{Р}}$) количественных значений.

1. Теоретическое число взаимосвязей между параметрами и органами управления объекта, относящихся к данной оперативной задаче, — $K_{1\text{Т}}$.

Зная условие задачи и оптимальный алгоритм ее решения, можно по структурной схеме БСП (см. рис. 3) рассчитать минимальное — теоретическое значение первого фактора $K_{1\text{Т}}$. Значение $K_{1\text{Р}}$ получается из анализа действий испытуемых в основном по записям комментариев хода решения задач и данным опроса, специально направленного на выявление реального значения факторов. В расчет принимается повторяющееся, статистически достоверное значение $K_{1\text{Р}}$ (точнее, надбавка к $K_{1\text{Т}}$, равная $K_{1\text{Р}} - K_{1\text{Т}}$, отражающая как бы результат процесса индукции — активации в сознании испытуемого вследствие специфики зрительного отображения задачи дополнительных связей между элементами объекта, не относящихся непосредственно к данной задаче, иррелевантных для ее решения).

Далее мы будем рассматривать только способ определения $K_{j\text{Т}}$ из анализа задачи и объекта; $K_{j\text{Р}}$ получается аналогично, но из анализа действий испытуемых. Ниже мы приведем пример расчета $K_{j\text{Т}}$ и $K_{j\text{Р}}$ для одной из задач.

2. Число последовательных ступеней влияния (т. е. число звеньев в цепи распространения исходного возмущения и управляющих воздействий) — $K_{2\text{Т}}$.

Например, включение насоса *038* непосредственно приводит к повышению давления P_{302} (1-я ступень влияния), в то же время повышение P_{302} приводит к понижению температуры t_{301} (2-я ступень), в свою очередь, повышение t_{301} включением пара (открытием задвижки *96*) приводит к повышению уровня конденсата H_{297} (3-я ступень).

3. Число связей разных типов: прямых ($K_{3\text{Т}}^{\text{п}}$); косвенных ($K_{3\text{Т}}^{\text{к}}$); нестандартных технологических ($K_{3\text{Т}}^{\text{т}}$) и нестандартных аварийных ($K_{3\text{Т}}^{\text{а}}$).

Под прямыми связями понимаются непосредственные, наиболее сильные связи между входными воздействиями или параметрами и выходными (или промежуточными) параметрами, характеризующиеся большими статическими коэффициентами усиления и сравнительно малыми постоянными времени.

Под косвенными связями понимаются побочные, более слабые влияния изменений входных величин, помимо прямых выходов, одновременно еще и на другие выходные (или промежуточные) параметры. Прямые связи обозначены на структур-

ной схеме БСП сплошными линиями, косвенные — штриховыми. Нестандартные технологические связи — это применение каналов воздействия на параметры как бы не по прямому их назначению. Например, понижение t_{301} может быть достигнуто очень быстро, но не экономично с точки зрения технологии — открытием задвижек *87* и *94* — перепуском основной массы сетевой воды мимо подогревателей. Стандартная зависимость t_{301} — от работы паровых линий (*95*, *93*, *96*), от давления по тракту (P_{294}, P_{302}), наконец, от уровня конденсата в подогревателях (H_{291}, H_{296}, H_{297}).

Особое место занимают нестандартные аварийные связи. Эти связи при нормальной работе оборудования никак не проявляются, более того, многие из них заранее не выявляются и разработчиками информационной системы, поэтому никак не отображаются на мнемосхеме, но при авариях они могут играть решающую роль, и их поиск в аварийной ситуации, как правило, представляет собой весьма сложную задачу для оператора и требует глубокого вникания в скрытую «за мнемосхемой» физику процессов.

Для экспериментальной «аварийной» задачи число нестандартных аварийных связей $\left(K_{3\text{Т}}^{\text{а}}\right)$ может быть определено. В качестве такой задачи взят, например, случай разрыва труб в подогревателе II ступени, вследствие чего падает давление P_{302} при всех включенных насосах и нормальном давлении по тракту БСП.

4. Отношение общего и оперативного объемов отображения (коэффициент избыточности информации) — $K_{4\text{Т}}$.

5. Число операций в алгоритме решения задачи — $K_{5\text{Т}}$.

6. Число операций в алгоритме реализации решения — $K_{6\text{Т}}$.

7. Число элементов, включенных в данную задачу (оперативный объем отображения), — $K_{7\text{Т}}$. Число критичных элементов — $K'_{7\text{Т}}$.

8. Число элементов, которые должны быть выстроены в очередь для обслуживания, — $K_{8\text{Т}}$.

9. Число элементов, входящих в наиболее крупную оперативную единицу восприятия, — $K_{9\text{Т}}$.

10. Число оперативных единиц восприятия — $K_{10\text{Т}}$.

11. Число оперативных единиц памяти — $K_{11\text{Т}}$.

12. Число элементов, входящих в наиболее крупную оперативную единицу памяти, — $K_{12\text{Т}}$.

13. Число возможных (конкурирующих) вариантов решения, которые оператору в среднем необходимо «проиграть» и сопоставить по результату и экономичности, — $K_{13\text{Т}}$.

14. Степень структурной неопределенности на данной мнемосхеме связей между критичными элементами ситуации (условно принято, что если элементы находятся на одном прямом потоке, то $K_{14}^{\text{I}} = 1$, на разветвлениях одного потока $K_{14}^{\text{II}} = 2$, на разных потоках $K_{14}^{\text{III}} = 3$, если же связь между ними скрыта,

т. е. не выражена на мнемосхеме, то $K_{14}^{IV} = 7$) $K_{14} = K_{14}^{I} + K_{14}^{II} + K_{14}^{III} + K_{14}^{IV}$. Все составляющие K_{14} получаются из совместного анализа задачи и структуры конкретного средства отображения информации. Теоретически возможно такое построение СОИ, что элементы, относящиеся к любой задаче, будут расположены на одном прямом потоке, так что $K_{14T} = 1$. Собственно, приближение к этому значению средней величины K_{14P} по всем оперативным задачам должно рассматриваться как одно из основных требований при выборе структуры СОИ.

15. Коэффициент интерференции вариантов решений K_{15T}. Что представляет собой явление интерференции применительно к решению мыслительных задач?

Анализ процессов решения задач и характера допущенных испытуемыми ошибок показал, что затруднение при решении иногда может возникать вследствие того, что предъявленное состояние объекта лишь относительно небольшим числом деталей отличается от одной или нескольких других ситуаций, действия в которых испытуемому хорошо известны, но к данному случаю они не подходят — должно быть найдено принципиально иное решение. В этом случае, если и не происходит ошибки в оценке ситуации, отнесении ее к адекватному классу задач и выборе приема решения, тем не менее поиск решения усложняется, от испытуемого требуются дополнительные затраты времени и волевое усилие, чтобы преодолеть интерферирующее (маскирующее) воздействие более привычных (вероятных по предыдущему опыту и большинству элементов возникшей ситуации), стандартных, но не верных в данном случае решений. Теоретически возможно на СОИ отображать все оперативные задачи с особым выделением их различительных признаков, так что интерференция будет исключена. Таким образом, $K_{15T} = 1$ для всех задач. Однако реально это явление устранить удается далеко не всегда, так что часто $K_{15P} > 1$.

Попытаемся в упрощенном виде проанализировать это явление и найти формальное выражение K_{15P}.

Как известно, каждое конкретное состояние объекта, в данном случае БСП, отображаемое на мнемосхеме, может быть выражено перечислением состояний всех элементов мнемосхемы (органов управления и параметров). Например, состояние

$$m_i = P^*_{238},\ P^*_{294},\ P^*_{302},\ t^{\downarrow}_{301},\ H^*_{291},\ H^*_{296},\ H^*_{297},$$
$$033—,\ 034\dashv,\ 80—,\ 81\dashv,\ 82\dashv \text{ и т. д.}$$

Такой метод задания состояния объектов, отображаемых на мнемосхемах, и все обозначения приведены в гл. 3. Нормальное значение параметра ранее принято $P^*_{288} = 11$, отклонение вниз $t^{\downarrow}_{301} = 01$; вверх — $t^{\uparrow}_{301} = 10$; нулевое значение параметров (отключенный блок) $P_{288} = 00$.

Если режим работы БСП нормальный, то $m_i = m^*_i$. При этом все параметры должны иметь значение 11.

Это соответствует нормальному, статическому состоянию объекта, при котором вмешательства оператора не требуется (задачи нет).

m_i — это по сути матрица — строка с N элементами. Вообще говоря, N равно полному числу элементов на мнемосхеме. Все состояния БСП, соответствующие использовавшимся в экспериментах оперативным задачам, представлены в виде полной матрицы в табл. 1.

Существует некоторый набор основных приемов управления данным объектом, изложенных в инструкциях по оперативному управлению. Для опытного оператора решение каждой конкретной задачи сводится к нахождению модификации одного из основных приемов управления, точно соответствующей условиям возникшей задачи, и лишь в отдельных случаях оператор сталкивается с проблемой. Процесс тренировки можно трактовать как выработку (усвоение) основных приемов, обучение классификации задачи и нахождению адекватной каждой отдельной задаче модификации приемов управления.

По мере тренировки оператор относит состояние объекта (задачу) к разным классам по приемам управления.

Обозначим M_j такие классы задач:

$$M_1 = \begin{vmatrix} m_1^1 \\ m_2^1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ m_k^1 \end{vmatrix}; \quad M_2 = \begin{vmatrix} m_1^2 \\ m_2^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ m_r^2 \end{vmatrix}; \quad M_3 = \begin{vmatrix} m_i^3 \\ m_2^3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ m_n^3 \end{vmatrix}.$$

Напомним, что каждое m_i^j — это строка из N элементов. Иногда для упрощения можно в каждой строке указывать только существенные элементы, а остальные опускать.

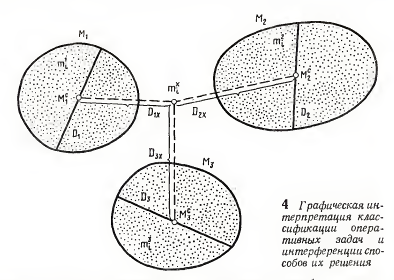
Однако это допустимо только на стадии обработки фактических данных уже проведенных опытов. В задачах прогнозирования деятельности испытуемых (операторов) этого делать нельзя, поскольку в процессе оценки ситуации и отнесения ее к одному из классов задач испытуемый осматривает, а иногда и ошибочно признает критичными посторонние (иррелевантные по отношению к данной задаче) элементы.

Итак, допустим, к определенному моменту обучения оператор усвоил $(k + r + n)$ задач и разбил их на три класса: M_1, M_2 и M_3.

Если при этом встречается, допустим, задача m_2^2, то оператор должен соотнести ее с классом приемов решения M_2 и найти частную модификацию решения M_2^2.

Математически это можно рассматривать как преобразование матрицы M_2 в нормальный (статический) вид $M_2 = M_2^*$.

Каждый из классов задач M_1, M_2, M_3 может характеризоваться набором постоянных признаков — неизменных (общих)



4 *Графическая интерпретация классификации оперативных задач и интерференции способов их решения*

частей объекта — равенством некоторых столбцов матрицы, а также сходством преобразующих операторов (например, такие задачи, как регулирование t, H, P или пуск агрегатов характеризуются определенными приемами решения и рассеянием отдельных ситуаций относительно центров множеств M_1^c, M_2^c, M_3^c, совпадающих с постоянными и наиболее вероятными элементами по столбцам внутри каждого класса).

Каждая строка матрицы M_i может быть представлена как $2N - 2k$ — разрядное двоичное число. Таким образом, каждая строка может быть отображена как точка в N-мерном пространстве. Множества M_1, M_2 и M_3 составятся соответственно из k, r или n точек.

Графически (условно на плоскости, хотя мы имеем дело с многомерными величинами) классы задач можно представить как области фазового пространства (рис. 4), где M_1^c — центр множества M_1, D_1 — его диаметр; для двух других множеств соответственно M_2^c и D_2, M_3^c и D_3.

Предположим, что перед оператором возникла новая ситуация m_i^x, которую он должен отнести к одному из известных классов задач (допустим, что m_i^x действительно принадлежит к одному из известных классов, а не открывает новый для оператора класс, т. е. не является полностью проблемной).

На рис. 4 m_i^x условно помещена между классами, чтобы наглядно показать, как это вначале представляется оператору. В дальнейшем он должен расширить границы одного из классов, включив в него и координату m_i^x.

Интуитивно ясно, что чем ближе m_i^x к центру своего класса и дальше от центров всех других классов, тем легче оператору

отнести эту ситуацию к ближнему классу. И наоборот, чем дальше от центров всех классов и больше минимальное из этих «расстояний», тем труднее задача классификации.

Можно использовать следующий частный критерий неопределенности (трудности) задачи классификации:

$$R = \varphi D_{jx\,\min} + (D_{1x} - D_{2x})^2 + (D_{2x} - D_{3x})^2 + (D_{3x} - D_{1x})^2,$$

где $D_{jx\,\min}$ — удаление m_i^x от ближайшего M_j^c;
D_{jx} — удаление от центров классов;
φ — постоянный коэффициент.

Расстояние $D_{M_j^c m_i^x}$ можно трактовать как эвклидовый интервал, так что $D_{M_j^c m_i^x} = 0$ только тогда, когда m_i^x совпадает с M_j^c. Множеству состояний объекта, которые объединяются как класс ситуаций M_i, соответствует множество точек области M_i фазового пространства.

Диаметр D_j множества M_j равен наибольшему расстоянию между двумя его точками (т. е. наибольшее поразрядное несовпадение между строками одной матрицы M_1, M_2 или M_3) и пропорционален мере множества M_j:

$$D_j = \xi DM_j.$$

Если закон распределения точек в M_j известен, то ξ равно доверительной вероятности попадания точек M_j в сферу с диаметром D_j и центром в M_j^c.

Координата центра каждого множества M_j^c и его мера могут быть выражены через условные вероятности соответствия решения M_j ситуации m_i, т. е.

$$X_{M_j}^c = p\left(\frac{m_i}{M_j}\right) = \frac{1}{K'_{7P}} \sum_{r=1}^{K'_{7P}} X_{ir},$$

где K'_{7P} — число критичных (значимых) элементов в строке матрицы M_j;
r — номер точки множества M_j;
X_{ir} — значение одного элемента в строке.

Мера множества M_j

$$D_{M_j}^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{K'_{7P}} \sum_{r=1}^{K'_{7P}N} (X_{ir} - \overline{X}_{ij})^2.$$

Поскольку

$$\overline{X}_{ij} = X_{M_j}^c = \frac{1}{K'_{7P}} \sum_{r=1}^{K'_{7P}N} X_{ir} = p\left(\frac{m_i}{M_j}\right),$$

то

$$D^2_{M_j} = \sum_{i=1}^{n} \overline{X}_{ij}\,(1-\overline{X}_{ij}) = \sum_{i=1}^{n} p\left(\frac{m_i}{M_j}\right) = N\left(\frac{m_i}{M_j}\right),$$

где

$$N\left(\frac{m_i}{M_j}\right) = 1 - p\left(\frac{m_i}{M_j}\right).$$

По полученным формулам на основе матрицы состояний могут быть рассчитаны координаты центров и меры множеств состояний объекта, соответствующих различным классам решений.

Для того чтобы формально определить степень сложности классификации впервые встретившейся испытуемому задачи, характеризующейся ситуацией m_i^x, рассчитывается соотношение интервалов между m_i^x и всеми M_j^c. Из полученного набора интервалов D_j выбираются $D_{\min}$ и $D_ф$, где $D_{\min}$ — минимальный интервал, $D_ф$ — интервал между возникшей ситуацией и центром множества, к которому фактически относится (по признаку адекватного способа решения) данная ситуация. Отношение $\frac{D_ф}{D_{\min}} = K_{15\,\min}$ — минимальное значение коэффициента интерференции решений $\left(\text{теоретически } \frac{D_ф}{D_{\min}} = 1 = K_{15Т}\right)$.

Полное значение коэффициента интерференции выражается суммой отношений $D_ф$ к каждому из интервалов, значения которых меньше $D_ф$ — от наименьшего, номер которого обозначим через $j\ (D_{\min})$, до ближайшего к значению $D_ф$, т. е. интервала с номером на единицу меньшим, чем $D_ф$: $j\ (D_ф) - 1$. Таким образом, для классов задач как множеств с четкими границами

$$K_{15Р} = \sum_{j\,(D_{\min})}^{j\,(D_ф)-1} \frac{D_ф}{D_j}.$$

Для иллюстрации методики определения $K_{jР}$ приведем примеры психологического анализа процессов решения двух задач — 1 и 12. Поскольку подробное изложение анализа всех 16 предъявлений этих задач заняло бы очень много места, мы приводим усредненные модели процессов решения этих задач, полученные на основе обобщения материалов опытов, в том числе фонограмм опросов и самоотчетов испытуемых, объективной регистрации алгоритмов реализации принятых ими решений, а также электроокулограмм. Приводимым моделям соответствуют средние реальные значения факторов сложности оперативных задач.

Задача 1. Исходная ситуация на объекте характеризуется отключенным состоянием всех агрегатов и закрытым положением органов управления (это

видно из строки—матрицы, соответствующей этой задаче в табл. 1). До предъявления мнемосхемы испытуемому сообщалось задание: «Произвести пуск блока сетевых подогревателей из полностью отключенного состояния».

В течение 30 с до предъявления мнемосхемы, отводившихся на уяснение, запоминание задания и сосредоточение на нем, некоторые испытуемые, среди которых были и опытные операторы, помня об общей экспериментальной установке — решать задачи не только безошибочно, но и максимально быстро, пытались с помощью представляемой мнемосхемы составить план решения поставленной оперативной задачи. Причем мы намеренно в ряде опытов изменяли длительность этого этапа от 10 до 70 с и затем, не предъявляя мнемосхему, требовали от испытуемого отчета о выполненных мысленно операциях, часто с прорисовкой мнемосхемы или более подробной технологической схемы объекта в аспекте возникшей задачи. Для более полного изучения процесса формирования предварительной психической модели состояния управляемого объекта наряду с анализом самоотчетов и рисунков производилась расшифровка электроокулограмм этапа решения до предъявления мнемосхемы. Анализ показал, что структура мысленно представляемой опытными операторами ситуации перед пуском носит весьма экономный характер: мысленно фиксируются в обобщенном виде наиболее важные функциональные группы агрегатов, такие как подъемные насосы (на рис. 2 — №№ *033, 034*), сетевые насосы (*037—039*), подогреватель первой ступени, подогреватели второй ступени и другие. Наиболее лаконично представляется весь контур отвода конденсата и регулирования его уровня в подогревателях. Все эти группы элементов играют роль оперативных единиц памяти и могут быть приближенно подсчитаны в качестве реального значения фактора K_{11}р. Поскольку число оперативных единиц памяти оказалось практически не отличимо от числа оперативных единиц восприятия (K_{10}р), то в дальнейшем учитывался только этот последний фактор. Для задачи 1 $K_{10}р = 10$. Психологический анализ процессов решения показал, что при мысленном прослеживании состояния объекта в памяти должны во многих случаях удерживаться не только собственно функциональные элементы и семантически целостные группы таких элементов (оперативные единицы памяти), но и их существенно различимые состояния. Это относится не к исходному состоянию объекта при решении задачи 1, когда все органы отключены, а к промежуточным его состояниям, которые испытуемый мысленно планирует как последовательные преобразования при достижении конечного состояния — выхода объекта на нормальные (заданные) значения параметров.

В качестве примеров различимых состояний функциональных групп испытуемые приводили 6 возможных состояний каждого подогревателя: полностью отключен, включен только по воде, включен только по пару, включен только по отводу конденсата, включен по пару и воде, полностью включен. Значительное число возможных состояний приходится также на группы насосов с задвижками. В дальнейшем, вполне вероятно, число различимых вариантов каждой оперативной единицы восприятия войдет в число контролируемых факторов сложности оперативных задач.

По мере увеличения длительности этапа решения до предъявления мнемосхемы наблюдалась все бóльшая детализация оперативно-психической модели объекта, что соответствовало мысленному моделированию преобразований состояния объекта от исходного «гомогенного» (с единым положением всех органов управления и равным значением всех элементов ситуации) к последующим, «гетерогенным». Переход от «гомогенной» к «гетерогенной» оперативно-психической модели является специфической особенностью задачи 1 (причем пуск объектов в работу из отключенного состояния — на практике очень распространенная оперативная задача; противоположным крайним случаем, связанным с обратным переходом от «гетерогенной» модели к «гомогенной», является задача отключения, остановки агрегатов). Психологическую основу таких переходов составляет изменение относительной значимости отдельных элементов и их групп. Причем в этих случаях особенно ясно проявляется влияние существа оперативной задачи как психологической установки (по Д. Н. Узнадзе) на структуру оперативно-психической модели объекта и внешнее поведение испытуемых.

Если испытуемым предлагалось просто ознакомиться с гомогенным (в данном случае полностью отключенным) состоянием объекта, то длительность фиксаций глаз и пространственное распределение точек фиксаций по мнемосхеме объекта были примерно равномерными. Если же давалось указанное выше задание, то структура оперативно-психической модели, схема осмотра мнемосхемы и даже траектория идеомоторных движений глаз в условиях представляемой мнемосхемы резко изменялись. Менялось соотношение значимости элементов: одни как бы «утапливались» в крупные функциональные единицы — оперативные единицы восприятия (или памяти в случае представляемой мнемосхемы), другие, наоборот, приобретали ранг обособленных критичных элементов данной ситуации.

Особенно часто в самоотчетах испытуемых фигурировали как наиболее критичные следующие три элемента ситуации: эжектор (*82*) и задвижки на обводной линии (*87* и *94*). Как выяснилось, у каждого оператора и испытуемого были случаи, когда с этими элементами были связаны грубые ошибки в решении (более того, пуск насосов без предварительного включения эжектора и заливки насосов приводит к выходу их из строя). К критичным элементам испытуемые в ходе решения задачи 1 в отдельных случаях относили также следующие элементы: один из подъемных насосов (*033* или *034*) с задвижками (*80* или *81*); сетевые насосы (*037* и *038*) с их задвижками (*89* и *90*); подогреватели первой ступени; один из подогревателей второй ступени и один насос (обычно *035* или *036*) и задвижку на перемычке (*88*) контура отвода и регулирования конденсата; параметры: давление — P_{288}, P_{294}, P_{302}, уровень — H_{291} и H_{296}, температуру t_{301}. Среднее число критичных элементов по экспериментальным данным составило $K'_{7\text{Р}} = 13$. Попутно заметим, что оптимальный алгоритм решения, который был выявлен в экспериментах с опытными операторами электростанции, связан с выделением в качестве критичных следующих групп элементов: 1) насоса первой ступени с задвижкой и эжектором; 2) насосов второй ступени с задвижками; 3) подогревателя первой ступени; 4) одного из подогревателей второй ступени; 5) целиком конденсатного контура; 6) целиком линии *86*, *037*, *89*, *94*; 7) параметра давления P_{288}; 8) выходных параметров: температуры t_{301} и давления P_{302}.

Таким образом, $K'_{7\text{Т}} = 8$. Это число было достигнуто также в опытах, в которых при решении задачи 1 применялось последовательное предъявление испытуемому сменных мнемосхем или последовательное высвечивание этих же контуров. Таким образом, одинаковое зрительное представление на мнемосхеме элементов, имеющих принципиально различное значение для решения данной задачи, приводит к увеличению реального значения числа критичных элементов ситуации по сравнению с теоретическим: $K'_{7\text{Р}} - K'_{7\text{Т}} = 5$. Еще бóльшая разница выявлена для общего числа элементов, включенных испытуемыми в решение задачи 1. Выписывая по фонограммам опросов и самоотчетов испытуемых все упоминаемые ими элементы, а также сверяя эти данные с окулограммами маршрутов осмотра предъявляемой мнемосхемы, мы установили, что при решении этой задачи испытуемые, как правило, включали в оперативный объем отображения все элементы мнемосхемы, кроме задвижек *83*, *85*, *92* и *98* и параметра *297*. Таким образом, $K_{7\text{Р}} = 35$ при $K_{7\text{Т}} = 23$. Соответственно получаем $K_{4\text{Р}} = 1{,}1$, $K_{4\text{Т}} = 1{,}7$. Следует констатировать, что данная мнемосхема недостаточно облегчает человеку зрительное выделение основных, в том числе критичных, информационных элементов. Это приводит также к усложнению важнейших операций по установлению причинно-следственных взаимосвязей между элементами объекта. В первую очередь оказалось, что испытуемые вследствие изолированности от главного контура сетевой воды вспомогательных контуров — греющего пара (линии *95*, *93*, *96*) и конденсата (нижняя часть мнемосхемы) с трудом выявляют характер косвенного влияния одного контура на другие.

Например, связь между числом включенных насосов и давлением очевидна по технологии, это же подчеркивается на мнемосхеме и расположением символов параметров давления после насосов (P_{288}, P_{294}). В то же время увеличение числа включенных насосов приводит к побочному действию —

снижению температуры. Поскольку такие косвенные связи на данной мнемосхеме не выделены, у испытуемых возникали большие затруднения при планировании полной цепи переключений, они не могли вовремя предвосхитить и предупредить возможные побочные следствия своих действий в ходе решения задачи. По этой причине испытуемые действовали часто путем перебора многих посторонних связей, пока находили существенные. Время решения значительно увеличивалось, поскольку, не имея возможности предсказать по мнемосхеме с данной структурой последствия своих действий, испытуемые вынуждены были ждать конечного результата оказанного влияния и только после этого реагировать на появившийся сигнал нового отклонения. Например, включив дополнительный насос, испытуемый не выявлял сразу необходимости включать также и дополнительный подогреватель. Еще реже испытуемые предвосхищали по данной мнемосхеме воздействие включения дополнительного подогревателя на количество отводимого конденсата, вследствие чего отклонялись от заданных значений уровни конденсата (для задачи 1 $K_{2Т} = 3$). Значение фактора сложности $K_{2Р}$ также равно 3, но это устанавливалось с большим трудом. Таким образом, выявилось резкое несоответствие между статической мнемосхемой и разобщенным представлением на ней физически связанных параметров, с одной стороны, и динамической целостной оперативно-психической моделью, необходимой для стратегического планирования действий по пуску и управлению технологическим объектом с предвосхищением не только прямых, но и многоступенчатых косвенных связей органов управления и параметров, а также связей между различными промежуточными и выходными параметрами. Важность обеспечения такого взаимного соответствия структур информационной и оперативно-психической моделей для снижения сложности оперативных задач подтверждается нашими экспериментами с групповой динамической информационной моделью, обеспечивающей интегрированное, симультанное восприятие всех взаимосвязанных параметров объекта как целостного динамического образа (см. гл. 4, п. 13).

В данном случае связи на мнемосхеме скрыты и выявляются с большим трудом — в основном либо путем актуализации в памяти знаний о внутренней физико-технологической структуре объекта, либо с большим опозданием — по нежелательным результатам воздействий на объект в ходе решения задачи.

Для облегчения подсчета теоретического и реального значений факторов сложности, определяемых общим числом связей ($K_{1Т}$ и $K_{1Р}$), а также прямых $\left(K_{3Т}^{п}, K_{3Р}^{п}\right)$, косвенных $\left(K_{3Т}^{к}, K_{3Р}^{к}\right)$, нестандартных технологических $\left(K_{3Т}^{т}, K_{3Р}^{т}\right)$ и нестандартных аварийных $\left(K_{3Т}^{а}, K_{3Р}^{а}\right)$ связей мы предложили использовать структурные схемы объектов. Подобная схема блока сетевых подогревателей показана на рис. 3.

На основе содержательного анализа действий испытуемых мы строили по этому же принципу схему связей объекта, отражаемых оперативно-психическими моделями индивидуумов. Сопоставляя объективную структурную схему и ее субъективное отражение, можно предсказать, в частности, какой тип задачи представит для данного оператора наибольшую трудность на этапе выявления внутренних связей в объекте. Таким именно способом была найдена задача 12, процесс решения которой мы рассмотрим ниже.

Расчеты по структурной схеме показали, что для отображения связей между элементами объекта данная мнемосхема практически не приспособлена: $K_{1Р} = 42$, $K_{3Р}^{п} = 19$ и $K_{3Р}^{к} = 23$, что превышает соответствующие теоретические оптимальные значения в 2—3 раза. Таким образом, улучшение наглядного отображения связей является одним из наиболее радикальных путей совершенствования данной мнемосхемы и снижения реальной сложности оперативных задач.

Планирование всей цепи операций связано прежде всего с выстраиванием элементов в очередь для дальнейшего учета в процессе решения задачи (или «обслуживания» — по Г. В. Репкиной [102]): $K_{8Т} = 14$; $K_{8Р} = 19$. Таково число автономных элементов (имеющих самостоятельное значение) и функцио-

нальных групп элементов, обслуживаемых связанно: 1) линия *80*, *87*, *89*, *94*; 2) эжектор *82*; 3) подъемные насосы *033* и *034*; 4) сетевые насосы *037*, *038*, *039*; 5—7) подогреватели; 8—9) линии отвода конденсата с насосами; 10—11) линии перелива конденсата (88 и 83); 12—13) шунтирующие задвижки *87* и *94*; 14—19) параметры P_{288}, P_{294}, P_{302}, t_{301}, H_{296}, H_{297}. Задвижки *87* и *94*, резервные насосы *034* и *039* и линия *83* могут не учитываться, так что $K_{8P} - K_{8T} = 5$; $K_{9T} = 7$. Наиболее крупной оперативной единицей восприятия является группа сетевых насосов с задвижками и точкой контроля давления воды за ними (*037*, *038*, *039*, *89*, *90*, *91*, P_{294}). Группа подъемных насосов включает 6 элементов, каждый подогреватель 4—5. Данные о K_{9P} оказались нестабильными, поэтому K_9 в таблицу не включен.

Анализ процессов решения задачи 1 всеми испытуемыми показал, что основные трудности и задержки в решении (в том числе и максимальное число фаз по ЭОГ) приходятся на этап оценки и диагностирования ситуации, выявления скрытых существенных связей и предсказания возможных результатов наиболее вероятных способов воздействия на состояние объекта, т. е. на этап формирования адекватной, «специализированной» применительно к возникшей задаче оперативно-психической модели объекта.

Если ситуация определена верно и притом однозначно, то последующее принятие решения представляется в виде одной или нескольких (если есть конкурирующие варианты решения) цепей логических операций, которые могут быть представлены в символической форме как алгоритмы, после чего тривиальным подсчетом числа операций в алгоритме принятия решения определяется значение K_{5P}. Следует отметить, что этот этап обычно без особого труда в подробностях выявляется из самоотчета испытуемых, поскольку принятие ответственного оперативного решения строго логически обосновывается и в большинстве случаев человек при этом пользуется исключительно вербализованными операциональными смыслами элементов ситуации. В ряде опытов мы особо регистрировали миограмму гортани, пытаясь соотнести ее активацию с внутренней речью в период вербализации решения в его логической фазе. Хотя и обнаружена стабильность активаций миограммы гортани непосредственно перед выдачей команд по реализации принятого решения, установлено, что вербализованные логические действия занимают намного больше времени, чем период активации миограммы. Особую трудность представляет выявление числа вариантов решения, отбракованных при поиске основного, реализованного, поскольку многие предварительные варианты «проигрываются» операторами лишь на качественном уровне, без глубокого логического анализа и детальной вербализации. Наряду с методами психологического анализа невербализованных смыслов ситуаций, введенных в экспериментальную практику О. К. Тихомировым, нами использовались дополнительные методические приемы, такие как прослеживание испытуемым в некоторых опытах с помощью указки тех элементов и контуров, которые он включает в ход решений, в том числе пробных. План опроса испытуемых иногда строился на основе

электроокулограммы, позволяющей выявлять возможные области повышенного внимания испытуемого, часто связанные с конкурирующими вариантами решения. Вообще для получения подробной электроокулограммы и «привязки» взора к идентифицируемым информационным элементам выбранная мнемосхема вполне подходит, поскольку опознание сигналов положения органов управления и особенно считывание их вызывных номеров требуют точного визуального фиксирования каждого элемента мнемосхемы.

Анализ выявил, что испытуемые моделировали четыре варианта решений задачи 1: при отключенных подогревателях, при включенных по воде подогревателях, различающиеся экономичностью, а также два явно ошибочных — при отключенном эжекторе и без регулирования уровня. Последняя, наиболее типичная ошибка обусловливалась недоучетом третьей ступени влияния в цепи распространения регулирующего воздействия: давление—температура—уровень, которая, как мы уже отмечали, особенно слабо отражена на данной мнемосхеме. Причем из среднего числа конкурирующих вариантов решения $K_{13P} = 3$ при решении задачи 1 очень часто верное решение — при отключенных подогревателях — заслонялось более привычным и кажущимся более быстрым — с пропуском воды непосредственно через подогреватели. Это приводило к задержкам и даже ошибкам в решении. Объясняется это тем, что пропуск воды через подогреватели — наиболее вероятное состояние схемы объекта, к тому же структура мнемосхемы построена так, что обводные задвижки *87* и *94* далеко отнесены от символов подогревателей, чем затрудиено соотнесение органов управления с функциями основных агрегатов. Таким образом, менее экономичное, но более привычное и броское решение оказывает на поиск верного решения интерференционное влияние: $K_{15P} = 2$.

Расчет числа операций в алгоритме принятия решения (фактор K_{5P}) проводился непосредственно по алгоритмической записи выявленных мыслительных логических операций. Ниже мы приводим типичный вариант решения задачи 1. Используются обозначения, введенные нами в [21]:

$$\{[(1—80;\ 2—87;\ 3—89;\ 4—94;\ 5—82)\to 6T];\ 7—033;$$

$$8KP_{288};\quad [(P^*_{288})\to 9-037;\quad 10-038];\ 11KP_{294};$$

$$[(P^*_{294})\to 12KP_{302};\quad (P^*_{302})\to(13-60;\quad 14-61)\to 15KH_{291};$$

$$[(H_{291})>(H^*_{291})\to 16-95;\quad 17T;\quad 18KH_{291};$$

$$[(H^*_{291}\to 19-84;\quad 20-035];\quad 21-62;\quad 22-63;\quad 23KH_{296};$$

$$[(H^*_{296}\to 24-93;\quad 25KT_{301}];\quad [(T_{301}<T^*_{301}\to 26\dashv 94])\};$$

$$27KT_{301};\quad 28KP_{302};\quad 29KH_{291};\quad 30KH_{296};$$

$$\{31-34K\,[(T^*_{301})\wedge(P^*_{302})\wedge(H^*_{291})\wedge(H^*_{296}]\}\to \text{пуск произведен.}$$

Из представленного алгоритма прямо следует: $K_{5P} = 34$.

Число операций по изменению состояния элементов объекта, т. е. по реализации решения, составляет $K_{6P} = 18$.

Такое алгоритмическое представление логических действий показывает, что наряду с актуализацией в памяти сложных скрытых взаимосвязей между элементами объекта основными психическими процессами при решении задачи 1 являются также мысленное моделирование требуемого состояния объекта, планирование длинной цепи информационно-поисковых, исследовательских и управляющих действий с антиципацией изменения различных параметров в каждом звене цепи действий и организацией соответствующих опережающих воздействий на объект для достижения заданного равновесного состояния объекта.

На основе приведенного содержательного и логико-психологического анализа процессов решения в матрицу-строку, соответствующую в табл. 3 задаче 1, внесены значения всех K_{jP}. Кроме того, на основе этого анализа и сопоставления K_{jP} с K_{jT} может быть сделан ряд предварительных выводов на качественном уровне о несоответствии структуры мнемосхемы БСП процессу решения задачи 1, упомянем наиболее общие из них:

1. Большая нагрузка на память в связи с актуализацией большого числа скрытых связей между элементами объекта, не отраженных на данной мнемосхеме вследствие ее чисто топологической структуры.

2. Трудное выделение критических элементов вследствие равного отображения всех элементов.

3. Особенно сложно с опорой на данную мнемосхему мысленно моделировать результаты реализации тех или иных вариантов решения и предвосхищать распространение воздействия по многоступенчатым косвенным динамическим связям, приводящим с запаздыванием к нежелательным отклонениям параметров.

Рассмотрим также в качестве примера анализ процесса решения задачи 12, связанный с устранением аварийного нарушения в работе управляемого объекта.

Если пуск агрегатов, с которым связана задача 1, является хоть и весьма сложной, но часто осуществляемой операцией, при повторении которой по мере выполнения информационно-поисковых и исследовательских действий у операторов постепенно формируется адекватное предметное мышление и психическая модель, отражающая основные прямые и косвенные связи между элементами объекта, то в противоположность этому задача 12 является очень редкой, нестандартной.

Суть задачи, которая должна быть самостоятельно в ходе решения раскрыта испытуемым, состоит в том, что при всех включенных насосах падает давление P_{302} вследствие разрыва труб и утечки воды в одном из подогревателей второй ступени. Причем контроль всех параметров, кроме сигнализируемого падения давления на выходе БСП, должен быть осуществлен самим испытуемым избирательно, по вызову.

Вообще исходная ситуация, когда все органы управления, кроме *82*, *83*, *87*, *94*, *93*, *96*, *88*, *85*, *92* и *98*, открыты, все агрегаты, кроме насоса *036*, включены и при этом падает давление, воспринимается поначалу испытуемыми как парадоксальная. Первое, привычное действие — поиск на мнемосхеме резервного насоса, который можно было бы включить и тем самым прямо воздействовать на давление. Электроокулограмма отражает многократные фиксации взора поочередно на каждом насосе. Далее обычно высказывалось предположение, что либо сигнализация отклонения параметра P_{302}, либо сигнализация состояния насосов неисправна. После проверки исправности сигнализации испытуемый еще раз производил осмотр состояния — сначала по элементам, затем по группам — оперативным единицам восприятия. Далее, как правило, на электроокулограмме отмечалась длительная фиксация глаз ($t_ф \gg 1$ с) — почти полная депрессия глазодвигательного поведения. Опрос испытуемых показал, что, видя бесполезность продолжения поиска ключа к смыслу ситуации непосредственно на мнемосхеме, они стремятся

отвлечься, «отстроиться» от мнемосхемы и, сосредоточившись, актуализировать в памяти прошлый опыт и попытаться найти сходные среди ранее встречавшихся ситуаций либо детализировать оперативно-психическую модель, включая в нее различные скрытые (не отраженные на информационной модели) данные о внутренней физической структуре объекта.

Результатом такой интенсивной мнестической и мыслительной деятельности в большинстве случаев было выявление проблемной ситуации, формулирование ряда гипотез и составление общего поискового плана диагностирования состояния объекта и обнаружения причин нарушения. В двух случаях испытуемые, столкнувшись с проблемной ситуацией, отказывались от продолжения решения этой задачи. Это свидетельствует об эмоционально-волевом напряжении при ее решении.

Опытные операторы выдвигали обычно ряд гипотез, в том числе, предполагали утечку воды на выходе подъемных насосов, в подогревателе первой ступени, на выходе сетевых насосов, в подогревателе второй ступени. Заметим сразу, что поскольку в задаче действительно был последний вариант нарушения, то с учетом приведенной типичной очередности исследования вариантов должен быть принят коэффициент интерференции $K_{15P} = 4$. В данном случае преимущественная проверка неверных вариантов объясняется не их большей частотой в предыдущем опыте или стандартностью, а привычностью последовательности проверки функционирования агрегатов по ходу технологического потока (на этой мнемосхеме слева направо).

Диагностирующие, исследовательские действия, выполнявшиеся испытуемыми в ходе проверки выдвинутых гипотез, включали следующие операции: 1) контроль давления P_{288} после подъемных насосов (давление P_{288} в норме, поэтому первая гипотеза отвергалась); 2) открытие обводной задвижки *87* и отключение по пару и воде подогревателя первой ступени; проверка, не пришло ли в норму давление на выходе БСП — P_{302}. Визуальное соотнесение подогревателя первой ступени, находящегося в левой половине мнемосхемы и выходного давления P_{302} особенно ясно видно по окулограмме; 3) далее восстанавливается состояние подогревателя и контролируется давление P_{294}; 4) поскольку давление P_{294} в норме, остается последняя гипотеза — утечка в одном из подогревателей второй ступени. К этому моменту испытуемые затрачивали на решение задачи 12 очень много времени и начинали торопиться, рассчитывая число действий при разных путях выявления того подогревателя, в котором должна быть утечка. Отметим, что на мнемосхеме очень ярко, красным цветом, выделены паровые линии, на которых в данном случае закрыты задвижки *93* и *95*. Это обстоятельство отразилось почти на всех опытах: испытуемые соотносили отключенные паровые линии с работающим откачивающим конденсатным насосом *059*. Отключив его на некоторое время, они обнаруживали быстрое повышение уровня H_{296}, H_{297}, подтверждая верность выдвинутой гипотезы. Электроокулограмма при последовательной отбраковке гипотез показала постепенное сужение поля зрения и сосредоточение в конечном счете внимания на подогревателях второй ступени.

Если на первом этапе ознакомления с ситуацией, выявлении проблемной задачи и формировании гипотез мы наблюдали укрупнение оперативных единиц восприятия (их общее число $K_{10P} = 9$), то на последнем этапе выявлена обратная тенденция — детализация, визуальная декомпозиция таких единиц, переход к поэлементному, сукцессивному восприятию мнемосхемы. Последний этап решения задачи — чисто логико-комбинаторный: поочередное отсечение подогревателей и контроль при этом давлении P_{302}. Число логических операций в решении $K_{5P} = 26$. Весьма любопытный факт состоит в том, что почти все испытуемые, обнаружив и изолировав подогреватель, в котором разорваны трубы, и восстановив нормальное давление P_{302}, тотчас констатировали окончание решения задачи. И только двое, в том числе опытный оператор с электростанции, обнаружили связь между ликвидацией утечки и работающим насосом *059*, который необходимо срочно отключить или подать пар в подогреватель, иначе насос *059* оказывается в опасном режиме — без залива водой — и подвергается разрушительной кавитации. В то же время общее число ступеней влияния, которые перебирали испытуемые ($K_{2P} = 3$), больше теоретически необходимого ($K_{2T} = 2$).

Анализ данных решения задачи 12 показал, что основными психическими процессами и действиями являются:

1. Диагностирование ситуации на основе общей оценки состояния объекта, значений всех параметров, соотнесение между собой большого числа данных и последовательный логический анализ взаимосвязей между элементами объекта.

2. Эмоционально-волевое усилие для преодоления интерференционного влияния известных способов решения, не адекватных в данном случае, и выявление проблемной задачи.

3. Формулирование и последовательная проверка гипотез.

4. Детализация оперативно-психической модели на основе предметного мысленного отражения реальности на объекте, не отображенной на мнемосхеме.

5. Антиципация и мысленное моделирование динамических процессов и побочных результатов решения задачи и планирование опережающих воздействий для достижения равновесного, устойчивого конечного состояния управляемого объекта.

В данном случае мы изложили основной ход решения испытуемыми задачи 12, из анализа которого были определены значения факторов сложности, среди них число нестандартных аварийных связей $K_{\text{зр}}^{\text{а}} = 5$ (очевидно, что $K_{\text{зт}}^{\text{а}} = 2$). Все $K_{j\text{р}}$ для этой задачи указаны в соответствующей строке табл. 3.

Важно отметить, что и в данном случае мнемосхема затрудняет обнаружение и осмысление скрытых связей, особенно таких нестандартных, как влияние разрыва труб на давление P_{302} и поломку насоса *059* вследствие устранения основного нарушения (т. е. замена вследствие неполного решения задачи одного нарушения другим, еще более тяжелым). Весьма важно, как показал проведенный психологический анализ, при возникновении аварийных, нестандартных ситуаций обеспечивать оператору возможность получать детальную информацию о состоянии всех основных параметров объекта. Совершенно необходимыми в тех ситуациях, когда на мнемосхеме не может быть отображена непредвиденная ситуация, являются глубокие знания оператора о физико-технологической структуре объекта, хорошо развитая предметность мышления и гибкая оперативно-психическая модель объекта с большим запасом знаний о скрытых, редко проявляющихся связях между элементами реального объекта, хранящихся в «долговременной» памяти оператора. Отсюда следуют требования придания гибкости информационной модели и специальных регулярных аварийных тренировок и обучения оперативного персонала. Количественные теоретические и реальные значения факторов сложности всех экспериментальных оперативных задач приведены соответственно в табл. 2 и 3. Эти значения использовались при общем статистическом (корреляционном и регрессионном) анализе.

Таблица 2

Теоретические значения факторов сложности экспериментальных задач ($K_{j\text{T}}$

№ задачи	Число значимых связей $K_{1\text{T}}$	Число ступеней влияния $K_{2\text{T}}$	Число прямых связей $K_{3\text{T}}^{п}$	Число косвенных связей $K_{3\text{T}}^{к}$	Число нестандартных технологических связей $K_{3\text{T}}^{т}$	Число нестандартных аварийных связей $K_{3\text{T}}^{а}$	Коэффициент избыточности информации $K_{4\text{T}}$	Число операций в алгоритме решения $K_{5\text{T}}$	Минимальное число операций по реализации решения $K_{6\text{T}}$	Оперативный объем отображения $K_{7\text{T}}$	Число критичных элементов $K'_{7\text{T}}$	Число элементов, выстраиваемых в очередь $K_{8\text{T}}$	Число оперативных единиц восприятия $K_{10\text{T}}$	Число конкурирующих вариантов решения $K_{13\text{T}}$	Коэффициент маскировки связей на мнемосхеме $K_{14\text{T}}$	Коэффициент интерференции $K_{15\text{T}}$
1	16	3	6	10	0	0	1,7	21	16	23	8	14	10	3	1	1
2	14	2	4	10	0	0	5	4	1	8	1	6	4	2	1	1
3	11	1	6	5	0	0	4,4	5	2	9	3	7	6	2	1	1
4	16	2	6	10	0	0	3,3	10	5	12	6	8	8	5	1	1
5	7	1	4	3	0	0	2,8	7	3	14	4	6	3	1	1	1
6	16	3	6	10	0	0	2,2	8	5	18	6	12	8	2	1	1
7	9	1	4	5	0	0	2,8	8	3	14	3	6	4	1	1	1
8	11	1	2	7	2	0	8	6	3	5	3	5	4	3	1	1
11	10	1	6	5	0	0	6,6	5	2	6	3	4	3	2	1	1
12	14	2	4	8	0	2	2	14	7	20	7	14	9	4	1	1
14	16	3	6	10	0	0	2,8	10	3	14	5	10	8	5	1	1

Таблица 3

Реальные значения факторов сложности экспериментальных задач (K_jР)

№ задачи	Число значимых связей $K_{1Р}$	Число ступеней влияния $K_{2Р}$	Число прямых связей $K_{3Р}^{п}$	Число косвенных связей $K_{3Р}^{к}$	Число нестандартных технологических связей $K_{3Р}^{т}$	Число нестандартных аварийных связей $K_{3Р}^{а}$	Коэффициент избыточности информации $K_{4Р}$	Число операций в алгоритме решения $K_{5Р}$	Число операций по реализации решения $K_{6Р}$	Оперативный объем отображения $K_{7Р}$	Число критичных элементов $K'_{7Р}$	Число элементов, выстраиваемых в очередь $K_{8Р}$	Число оперативных единиц восприятия $K_{10Р}$	Число конкурирующих вариантов решения $K_{13Р}$	Коэффициент маскировки связей на мнемосхеме $K_{14Р}$	Коэффициент интерференции $K_{15Р}$
1	42	3	19	23	0	0	1,1	34	18	35	13	19	10	3	6	2
2	20	2	4	16	0	0	2,4	4	3	16	1	6	4	2	4	1
3	12	1	6	6	0	0	2,5	6	2	15	4	8	6	2	5	1
4	26	3	6	20	0	0	1,1	18	5	18	14	22	8	5	8	2
5	8	1	5	3	0	0	3,8	8	5	10	4	6	3	1	3	1
6	20	3	6	14	0	0	1,1	12	5	34	10	16	8	2	8	2
7	10	1	4	6	0	0	1,1	8	3	35	3	6	4	1	7	1
8	14	1	2	10	2	0	5,5	12	4	7	6	7	4	3	11	2
11	12	2	6	6	0	0	3,8	6	2	10	4	6	3	2	5	1
12	34	3	8	22	0	5	1,7	26	13	22	18	20	9	4	14	4
14	26	3	6	20	0	0	1,1	18	3	34	14	22	8	5	8	2

6 Методы поиска оптимальных решений

Для определения теоретических, оптимальных значений факторов сложности оперативных задач ($K_{j\text{т}}$) необходимо знать оптимальный способ решения каждой задачи. Для простого объекта, такого как блок сетевых подогревателей, оптимальные решения задач и их информационная основа (совокупность сведений о состоянии объекта, его параметрах, связях между ними и т. д.) могут быть определены путем элементарного перебора вариантов и экспертным методом — опросом операторов объекта.

В общем случае поиск оптимальных решений весьма сложен. Для этих целей могут быть применены аппарат теории принятия решений и некоторые другие аналитические методы, как правило, комбинируемые с экспериментальными.

Аналитические методы в рассматриваемой нами области чаще всего должны рассматриваться как оценочные, приближенные. Контроль оптимальности конечного решения, выбор наилучшего варианта решения из совокупности выявленных аналитически должен производиться людьми — разработчиками информационной системы, возможно, с привлечением технологов, эксплуатационников, операторов АСУ. Это требование вытекает непосредственно из конечной цели, которую мы ставим: рационализация СОИ и на этой основе оптимизация решений, принимаемых человеком-оператором в системах, для которых строгих формальных методов принятия оптимальных решений в настоящее время не существует.

Как известно, процесс принятия решения характеризуют следующие основные элементы.

1. Цель. В АСУ ТП необходимость принятия решения в большинстве случаев вызывается несоответствием состояния технологического комплекса, его выходных или промежуточных параметров требуемым.

2. Альтернативные варианты решения. Возможность взаимоисключающих решений, т. е. средств достижения цели, является необходимым условием задачи выбора решения. Составление достаточно полного перечня альтернативных решений представляет собой, как правило, сложную творческую задачу, решение которой чрезвычайно усложняется в условиях оперативного управления жестким ограничением во времени. Не редкость, когда не оптимальное, но быстро принятое решение неизмеримо лучше оптимального, но принятого с опозданием. Поэтому при изучении деятельности операторов мы нередко встречаемся с фактом единственности найденного и реализуемого решения.

3. Объективное состояние управляемой системы (в общем виде — «состояние внешней среды» или «внешние условия»). Как подчеркивают Д. Ю. Панов и В. П. Зинченко [57, 94], характерной особенностью деятельности человека-оператора является необходимость почти всегда принимать решения при не полностью определенном состоянии системы, по неполной информации.

4. Исходы — конечные состояния управляемой системы (объекта) в результате реализации того или иного из альтернативных решений. Для оценки исходов применяются такие понятия, как «ущерб» («убыток»), «полезность», «выигрыш» и т. д.

5. Правило выбора решения. Выбор наилучшего из альтернативных решений зависит от набора таких решений, составленного оператором, его способности смоделировать и сопоставить соответствующие этим решениям исходы. Вообще для строгого задания правила выбора решений необходимо определить алгоритм, который при решении любой задачи однозначно указывает действия, тавтологически называемые «оптимальными согласно данному правилу выбора решения».

В АСУ ТП оперативные решения могут приниматься в условиях определенности, риска и неопределенности. Причем сравнение альтернативных, конкурирующих вариантов решения может производиться как по одному, так, чаще, и по многим критериям. Под условиями определенности понимается жесткая связь каждого из вариантов решения с одним конкретным исходом. При риске каждый вариант решения может приводить к ряду возможных исходов, имеющих разные вероятности. Если веростности исходов не известны, то решение принимается в условиях неопределенности.

Методы формального анализа принятия решений в условиях определенности

Ограниченность методов современной теории оптимального управления состоит в общепринятости в ней предположения, что качество решения может быть оценено одним скалярным критерием.

Качество решения x обычно выражается показателем $w(x)$, который является действительным числом. Решение x^* считается наилучшим из данного набора альтернатив X, если при поиске максимума целевой функции обеспечивается соотношение $W(x^*) \geqslant W(x)$ или при поиске минимума $W(x^*) \leqslant W(x)$ (для всех $x \in X$ при заданных ограничениях). Критерии могут быть дискретными (с конечным числом оценок) и непрерывными.

Фишберн [137, 138] в своих исследованиях допустил для систем существование не менее двух критериев $X_1, X_2, \ldots, X_n$ $(n \geqslant 2)$, которые должны учитываться в процессе принятия решения.

При большом числе критериев трудность формализации процедуры принятия решения обусловлена тем, что множество X является частично упорядоченным. Обычно X представляется как декартово произведение $X_1 \times X_2 \times \cdots \times X_n$ всех критериев, т. е. множество всех n-мерных векторов $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, $x_i \in X_i$ для каждого i.

При векторном задании критерия первоначально должна быть выделена область компромиссов, или решений, оптимальных по Парето [90], т. е. подмножество максимальных (или минимальных) элементов множества допустимых решений. Для любых двух решений $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ и $y = (y_1, y_2, \ldots, y_n)$, принадлежащих этому подмножеству, существуют критерии X_i и X_j, такие, что одновременно $x_i < y_i$ и $x_j < y_j$, $i, j \in (1, 2, \ldots, n)$, $i \neq j$.

При векторном задании критериев одним из центральных является понятие независимости, или аддитивности, критериев.

Если $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ и $y = (y_1, y_2, \ldots, y_n)$ — любые два элемента множества исходов X, то в соответствии с теорией аддитивной полезности $x \leqslant y$ тогда и только тогда, когда $U(x) \lesssim U(y)$ и

$$U(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \sum_{i=1}^{n} U_i(x), \tag{1}$$

где U — вещественная функция полезности в пределах множества X, а U_i — вещественная функция полезности i-го критерия ($i = 1, 2, \ldots, n$).

Приведенное аддитивное уравнение показывает, что критерии взаимно независимы. Отсюда следует, что если величины всех критериев, кроме одного, для всех вариантов решений фиксированы, то решения могут быть сопоставлены по единственному изменяющемуся критерию. При этом, если при принятии решения отдается предпочтение (x_1, x_2) перед (y_1, x_2), то из уравнения аддитивности необходимо выполнение условия $(x_1, y_2) > (y_1, y_2)$ для любого y_2.

Иногда уравнение (1) представляют в виде

$$U(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \sum_{i=1}^{n} v_i \omega_i(x_i),$$

где v_i — положительная константа для каждого i;
$\omega_i(x_i)$ — вещественная функция полезности для i-го критерия.

Начало отсчета и единицу шкалы для каждого ω_i можно выбрать таким образом, чтобы все ω_i имели одинаковые шкалы. В разных случаях v_i называют степенью важности, весом, относительным диапазоном полезности и т. д.

Если критерии могут выражаться в двоичном коде, то получается соотношение $U(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \sum_{i=1}^{n} v_i(x_i)$, в котором $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ является двоичным вектором.

Э. И. Вилкас и Е. З. Майминас дали следующую трактовку задачи принятия решения.

Дано множество исходов $X = \{x\}$, каждый из которых характеризуется некоторым множеством критериев $\{X_1, X_2, \ldots, X_n\}$. Заданы отношения предпочтения — безразличия человека, принимающего решение, на множестве исходов относительно каждого критерия, а также некоторая информация относительно упорядочения им критериев.

Требуется полностью упорядочить множество исходов, совместив структуру отношения предпочтения — безразличия на множестве критериев со структурой отношения предпочтения — безразличия на множестве исходов относительно каждого критерия. Более слабое требование состоит в выделении непустого подмножества наиболее предпочтительных исходов [90].

Очевидно, что в этом случае анализ задачи принятия решения существенно зависит от степени сравнимости критериев.

Предполагается, что для каждого критерия задана или может быть построена функция полезности $U_i\,(X_i)$. Если на множестве критериев задана весовая функция $V\,(X_i)$, т. е. они количественно соизмеримы, то наиболее предпочтительному решению x^* соответствует $\max\limits_x \sum U_i\,(X)\,V\,(X_i)$. Таким образом, этот случай сводится к принятию решения при наличии одного критерия.

Для анализа задачи принятия решения предложена игровая трактовка: лицо, принимающее решение, рассматривается, как арбитр в игре, в которой каждый критерий выступает как игрок, стремящийся к максимальному выигрышу; арбитр должен дать схему определения «справедливого» исхода игры.

Если критерии количественно несоизмеримы, предполагается, что каждый из них является игроком, стремящимся максимизировать свою функцию полезности. Этому случаю соответствует некооперативная игра. Решение такой игры получается на основе теоремы Нэша изъятием из всего множества неподчиненных равновесных ситуаций тех ситуаций, которые нежелательны одновременно для всех игроков. Очевидно, что решение далеко не всегда может быть выражено в виде чистых стратегий.

Известны попытки [90] описать задачу для случая частично сравнимых критериев, объединяемых в группы с целью последующего представления исходной задачи как кооперативной игры игроков-критериев.

В ряде случаев выбор компромиссного, наиболее предпочтительного решения в многокритериальной задаче может осуществляться путем введения глобальной целевой функции — глобального критерия [72].

Методы формального анализа принятия решений в условиях риска

Основу теории принятия решения в условиях риска составили исследования Неймана—Моргенштерна по теории ожидаемой полезности [87]. На основе аксиом Неймана—Моргенштерна доказывается существование вещественной функции u, определенной на X, такой, что $x \lesssim y$ тогда и только тогда, когда $u(x) \leqslant u(y)$; $u(\alpha, x; 1-\alpha, y) = \alpha u(x) + 1(-\alpha) u(y)$.

Если u и v — две функции на X, удовлетворяющие этим соотношениям, то для всех $x \in X$ они связаны соотношением $v(x) = au(x) + b$ $(a > 0)$, т. е. функция полезности является единственной с точностью до положительного линейного преобразования. В теории ожидаемой полезности бинарное отношение предпочтения — безразличия $\lesssim$ рассматривается на множестве N распределения вероятностей на множестве исходов X.

Если

$$P \in R,\ Q \in R \text{ и } 0 \leqslant p \leqslant 1,$$

то P^*, определенное следующим образом:

$$P^*(x) = pP(x) + (1-p)Q(x)$$

для каждого $x \in X$ также является распределением вероятностей в N.

Один из основных выводов теории ожидаемой полезности формулируется в виде следующей теоремы: каждому распределению $P \in N$ можно приписать число $u(P)$ такое, что если P и Q — два распределения в N и M и $0 \leqslant p \leqslant 1$, то $P \lesssim Q$ тогда и только тогда, когда

$$u(P) \leqslant u(Q); \qquad (2)$$

$$u(pP + (1-p)Q) = pu(P) + (1-p)u(Q). \qquad (3)$$

Функция u распространяется на множество X, если определить $u(x) = u(P)$ при $P(x) = 1$; отношение $x \lesssim y$ означает, что $u(x) \leqslant u(y)$. Из условий P — распределение в N и все x^i различны следует

$$u(P) = \sum_{i=1}^{m} p(x^i)\, u(x^i). \qquad (4)$$

Если справедливы приведенные выше соотношения (3) и (4), являющиеся уравнениями ожидаемой полезности, то полезность любого распределения P из N можно вычислить как взвешенную сумму полезностей x, $x \in X$, причем веса являются вероятностями, определяемыми распределением P. Уравнения полезности вместе с соотношением (2) устанавливают предпочтительность распределения с более высокой ожидаемой

полезностью перед распределением с меньшей ожидаемой полезностью.

Функция u, удовлетворяющая (2) и (3), является единственной при линейных преобразованиях, сохраняющих упорядочение: если некоторая функция u на N удовлетворяет соотношениям (2) и (3), то другая функция v удовлетворяет им в том и только в том случае, если существуют числа $a > 0$ и b такие, что $u(P) = au(P) + b$ для всех $P \in N$.

Теорема об ожидаемой полезности справедлива, если соблюдаются следующие условия: 1) отношение $\lesssim$ является отношением слабого упорядочения, т. е. обладает свойствами транзитивности и связанности; 2) если P, Q и R — распределения из N и если $P < Q$ и $0 < p < 1$, то $pP + (1 - p) R < pQ + (1 - p) R$; 3) если P, Q и R — распределения из N и $Q < R$ и $P < Q$, то существуют числа p, q $(0 < p < 1,\ 0 < q < 1)$ такие, что $pP + (1 - p) R < Q$ и $Q < qP + (1 - q) R$ (непрерывность).

Из приведенных допущений, введенных Д. Бернулли, Нейманом и Моргенштерном [87], следует, что если $P < Q < R$, то существует единственное число p $(0 < p < 1)$ такое, что $Q \sim pP + (1 - p) R$.

В последние годы появился ряд работ [72], расширяющих сферу приложимости теоремы ожидаемой полезности на случай, когда неправомерно допущение непрерывности или отношение безразличия не является транзитивным. Исследование аксиомы транзитивности оказалось особенно важно для принципиальной оценки приложимости методов теории ожидаемой полезности к формульному описанию принятия человеком оперативных решений, поскольку в ходе работ установлено, что принимаемые человеком решения часто транзитивны.

Методы формального анализа принятия решений в условиях неопределенности

В этом случае задача сводится к выбору стратегии f из множества F, которая приведет к получению в точности одного не известного заранее исхода из множества X, зависящего от того, какое состояние реального объекта из множества состояний S является «истинным» состоянием.

Известные решающие правила (критерии выбора решения) устанавливают для задач принятия решения при неопределенности полный порядок предпочтения возможных действий или выделяют оптимальное подмножество действий. Примерами критериев выбора решения являются максиминный критерий, критерий минимаксного риска, критерий показателя пессимизма — оптимизма, критерий, основанный на принципе недостаточного основания, и др. [9, 72].

В отличие от принятия решения в условиях риска, когда вероятности различных исходов предполагаются известными, в данном случае можно говорить лишь о мере уверенности лица, принимающего решение, в том, что наступит тот или иной исход. Эту меру обычно выражают через субъективные вероятности.

Допустим, что множество состояний объекта («природы») S содержит элементы $s_1, s_2, \ldots, s_n$. Пусть $p(s_i)$ — вероятность предположения лица, принимающего решение, о том, что s_i является истинным состоянием объекта, а $f(s_i) \in X$ — исход реализации выбранной стратегии f при истинном состоянии объекта s_i.

Каждую стратегию $f \in F$ можно представить в виде n-мерного вектора исходов $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ из множества X, где $f(s_i) = x_i$ для каждого i. Таким образом, $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ является действием из множества F, которое приводит к исходу x_i, если s_i — истинное состояние объекта, $i = 1, 2, \ldots, n$. Множество действий F равно в этом случае всему множеству $X_1 \times X_2 \ldots \times X_n$ или его подмножеству. Основное свойство субъективной вероятности определяется следующим утверждением: каждому $x \in X$ можно сопоставить число $u(x)$, а каждому состоянию $s_i \in S$ можно сопоставить неотрицательное число $p(s_i)$ таким образом, что если $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ и $(y_1, y_2, \ldots, y_n)$ — действия из множества F, то $(x_1, x_2, \ldots, x_n) \lesssim (y_1, y_2, \ldots, y_n)$ в том и только в том случае, если

$$\sum_{i=1}^{n} p(s_i)\, u(x_i) \leqslant \sum_{i=1}^{n} p(s_i)\, u(y_i).$$

Для определения значений субъективных вероятностей используются два основных подхода [9, 72]. При интуитивном подходе к множеству событий или исходов применяются аксиомы сравнительного вероятностного отношения «не более вероятно, чем». Второй подход основан на аксиомах отношения предпочтения — безразличия $\lesssim$ («не предпочтительнее, чем»). В обоих случаях цель состоит в измерении вероятностей и определении функций полезности для получения субъективной вероятностной модели полезности, согласованной с отношением предпочтения—безраличия лица, принимающего решение.

При выборе оптимальной стратегии в условиях неопределенности во многих случаях необходим эксперимент (им может быть и «нуль-эксперимент», т. е. опыт, который никогда не ставился) для получения дополнительной информации об истинном состоянии объекта.

При определении оптимальных (теоретических) значений факторов сложности важно выбрать стратегию, связанную с минимальным числом пробных воздействий на объект или запросов дополнительной информации, т. е. соответствующую максимуму ожидаемой полезности.

Выбор эксперимента производится следующим образом. Пусть E — эксперимент; O_1, O_2, ..., O_m — возможные исходы E. Тогда $u(E, O_j;\ f(s_i))$ — полезность, соответствующая поставленному эксперименту E, наблюдаемому исходу O_j, выбранной стратегии f_j из F, приводящей к результату $f_j \times \times (s_i)$, если s_i — истинное состояние объекта. Пусть $p(s_i/E, O_j)$ — вероятность, с которой лицо, принимающее решение, оценивает утверждение о том, что s_i есть истинное состояние природы, если в результате эксперимента E имеет место исход O_j. Во многих случаях $p(s_i/E, O_j)$ вычисляется по теореме Байеса:

$$p(s_i/E,\ O_j) = \frac{p(s_i)\,p(O_j/E,\ s_i)}{p(O_j/E)},$$

где $p(O_j/E,\ s_i)$ — вероятность исхода O_j в эксперименте E при условии, что s_i — истинное состояние объекта, а $p(O_j/E)$ — вероятность исхода O_j в эксперименте E. Для E — «нуль-эксперимента» $p(s_i/E,\ O_j) = p(s_i)$.

Ожидаемая полезность эксперимента E при исходе O_j и стратегии f_j равна

$$\sum_i p(s_i/E,\ O_j)\,u(E,\ O_j;\ f_j(s_i)).$$

Стратегия f_j, максимизирующая эту сумму, обозначается через f^*, ее ожидаемая полезность выражается как

$$\sum_i^n \sum_j^m p(s_i)\,p(O_j/E,\ s_i)\,u(E, O_j;\ f^*(s_i)).$$

Фишберном [138] разработан подход к принятию решений в условиях неопределенности, не требующий непосредственного количественного определения субъективных вероятностей. Этот подход может быть применен для анализа теоретических значений факторов сложности решения задач, если лицо, проводящее такой анализ, способно заранее дать оценку всех потенциально возможных ситуаций на реальном объекте, результатов пробных (диагностирующих) действий и реализаций вариантов окончательных решений. Сравнительные оценки ситуаций выражаются с помощью отношения предпочтения—безразличия. При выполнении ряда аксиоматических предположений, позволяющих свести оценку полезности сложной ситуации к суммированию оценок компонентов, потенциально входящих в данную ситуацию, становится возможным вырабатывать количественные оценки любых стратегий (приемов) решения оперативных задач и выбирать из них оптимальные. Схема принятия решения содержит три этапа: предварительный эксперимент — пробное воздействие на управляемый объект, наблюдаемый результат такого воздействия и окончательно предпринимаемые действия.

Особым случаем является поиск оптимальных стратегий решения оперативных задач при проектировании системы

отображения информации вновь создаваемого объекта, когда проведение эксперимента невозможно. В этом случае типичным на практике выходом является организация коллективного принятия решений с частичной проверкой на неполных моделях объекта.

Проблема принятия коллективного решения в наиболее общем виде состоит в таком сочетании систем предпочтений отдельных лиц, принимающих решения, чтобы можно было создать единую систему предпочтений для коллектива, состоящего из этих лиц. Ряд формальных моделей коллективного принятия решений предложен Эрроу. Отношение $\lesssim_i$ ($i = 1, 2, \ldots, n$) обозначает в этих моделях порядок предпочтения i-го лица, принимающего решение, на множестве X. Отношение $\lesssim_i$ является транзитивным и связанным, так же как и отношение $\lesssim_S$, обозначающее коллективный порядок предпочтения на этом множестве. Функция коллективного выбора определяется Эрроу как отображение всех возможных множеств индивидуальных предпочтений в отношении $\lesssim_S$.

Если индивидуальные и коллективные порядки предпочтения удовлетворяют аксиомам теории ожидаемой полезности и если функция коллективного выбора удовлетворяет условию, в соответствии с которым коллективный выбор между двумя альтернативными решениями безразличен, когда каждый член группы безразличен к ним, то коллективная функция полезности должна быть линейной комбинацией функций полезности отдельных членов группы. В этом случае, как показали Богард, Верслюс и Тейл, задача сводится к определению весов в линейной комбинации функций [90]. Следует отметить, что изучение проблемы принятия коллективных решений еще только начинается. Причем основные трудности состоят не в применении формального математического аппарата, а в постановке задач, выборе критериев (очень часто в реальных системах — изменчивых), выборе и обосновании компромиссных, наиболее предпочтительных решений. Во многих практических случаях попытки свести поиск решения к формальному алгоритму оказываются в настоящее время несостоятельными. В связи с этим возрастает важность исследования психологических процессов принятия оперативных решений, в том числе определения оптимальных значений факторов сложности решения задач в ходе экспериментов с опытными операторами и принятия коллективных решений с постановкой контрольных натурных и модельных опытов.

Модельные опыты, широко распространенные в эксперимеальной психологии, предполагают определенное упрощение изучаемой реальной деятельности оператора с целью более строгого рассмотрения некоторых наиболее важных ее черт. Методические особенности подобных лабораторных исследований требуют применения специфического математического аппарата для формализации и обобщения их результатов.

Некоторые математические модели экспериментальных процессов принятия решений

Рассмотрим некоторые возможности формального анализа и определения путей оптимизации решений, принимаемых испытуемыми (операторами) для двух распространенных в экспериментальной практике случаев. В первом случае испытуемому дается задание, называемое в экспериментально-психологической практике «точностным»: основное внимание человека обращается на недопустимость ошибок. Время принятия решений при этом обычно колеблется в широких пределах. Второй случай — испытуемый работает максимально быстро (установка «на скорость»), выбирая решение из сравнительно небольшого набора возможных вариантов. Поведение человека оценивается в этих случаях «обратно исходной установке»: в первом случае критерием является время, за которое найдены наилучшие решения, во втором — отклонения от оптимального способа решения, т. е. ошибки.

Начнем рассмотрение задачи оптимизации деятельности оператора со второго случая, как более простого. Введем некоторые обозначения. Допустим, имеется управляемая система с N возможными состояниями ($i = 1, \ldots, N$). В каждом состоянии i оператор может принять Δ_i возможных решений. Набор решений для всех состояний системы в рассматриваемый интервал времени будем называть стратегией оператора. Совокупность стратегий, характерных для данного оператора, будем называть его политикой. Стратегия оператора может быть выражена как матрица переходных вероятностей $P^k = \| p_{ij}^k \|$ и соответствующая ей матрица выигрышей системы, получаемых от реализации каждого решения оператора, $R^k = \| b_{ij}^k \|$. В рассматриваемом случае «скоростной установки» поведения оператора можно принять, что система переходит из одного состояния в другое через равные промежутки времени. Таким образом, здесь может быть применен аппарат теории марковских процессов [139].

Рассмотрим политику оператора на конечном интервале времени (задается контрольная серия тест-задач) и при очень длительной работе (время наблюдения не ограничено).

Если проводится анализ на конечном интервале, то может быть оценен общий выигрыш от той или иной политики оператора. В этом случае применимы методы динамического программирования [9]. Для полного ожидаемого выигрыша за n шагов $v_i(n)$ при начальном состоянии системы i ($i = 1, \ldots, N$)

$$v_i(n) = \sum_{j=1}^{N} p_{ij} [b_{ij} + v_j(n-1)] = \sum_{j=1}^{N} p_{ij} b_{ij} + \sum_{j=1}^{N} p_{ij} v_j(n-1)$$

или $v_i(n) = q_i + \sum_{j=1}^{N} p_{ij} v_j(n-1)$, (5)

где $q_i = \sum_{j=1}^{N} p_{ij} b_{ij}$ — минимальный ожидаемый выигрыш системы.

Выражение (5) может быть представлено в матричном виде

$$\mathbf{V}(n) = q + P\mathbf{V}(n-1).$$

Применяя основное положение Беллмана об оптимальности любого отрезка оптимальной траектории, из уравнения (5) получим рекуррентное выражение для критерия оптимальности $n+1$-го решения, если политика оператора в целом оценена как оптимальная:

$$v_i^*(n+1) = \max_{k=1,\ldots,\Delta_i} \left\{ q_i^k + \sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k v_j^*(n) \right\}, \quad i = 1, \ldots, N. \qquad (6)$$

При неограниченном времени протекания оцениваемой деятельности оператора суммарный выигрыш системы также растет неограниченно, поэтому оценка политики оператора может производиться по среднему ожидаемому доходу от реализации одного решения. Для этого необходимо найти асимптотический вид полного ожидаемого дохода $v(n)$ при больших n, например, с помощью производящих функций (т. е. геометрического, или z-преобразования).

Как известно, z-преобразование применимо не только к функции натурального аргумента

$$f^g(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f(n) z^n,$$

но и к матрице или вектору путем преобразования каждого их компонента.

Преобразуем матрицу выигрышей, получаемую из выражения (6):

$$V(n+1) = q + PV(n) \to z^{-1}(V^g(z) - V(0) = q\frac{1}{1-z} +$$

$$+ PV^g(z) \to V^g(z) = \frac{z}{1-z}(I - zP)^{-1} q + (I - zP)^{-1} V(0). \qquad (7)$$

Обратное z-преобразование матрицы $(I - zP)^{-1}$ есть $H(n) = P^n$ или $H(n) = s + T(n)$, где s — постоянный член, представляющий собой матрицу, составленную из векторов предельных вероятностей состояний, а $T(n)$ — сумма дифференциальных матриц с коэффициентами, убывающими в геометрической прогрессии. Следовательно, мы можем записать

$$(I - zP)^{-1} = f^g(s + T(n)) = \frac{1}{1-z} s + Z(z), \qquad (8)$$

где

$Z(z) = f^g(T(n))$.

Подставляя соотношение (8) в уравнение (7) и взяв затем обратное z-преобразование от каждого слагаемого, мы получим асимптотический вид $\mathbf{V}(n)$ при больших n:

$$\mathbf{V}(n) = Ng + \mathbf{V} \qquad (9)$$

в матричном виде или

$$v_i(n) = ng_i + v_i, \quad i = 1, \ldots, N, \qquad (10)$$

причем в случае марковского процесса, состоящего из одного эргодического класса ($g_i = g_j = g$), имеем

$$v_i(n) = ng + v_i, \qquad (11)$$

где g — средний ожидаемый выигрыш от одного шага процесса, протекающего неограниченно долго:

$$g = \sum_{i=1}^{N} \pi_i g_i;$$

здесь π_i — предельные вероятности состояний процесса.

Различие в относительных величинах системного выигрыша от реализации единичных решений при разных i и j исходных состояниях системы выражается как

$v = z(1)\, g + sv(0)$.

Из уравнений (9)—(11) видно, что при длительной работе оператора при больших n функции выигрышей от каждого отдельного решения асимптотически приближаются к стационарному случайному процессу. Таким образом, задача оптимальной организации деятельности оператора по принятию решений (обеспечения его оптимальной политики) может рассматриваться по отдельным актам принятия решений вне зависимости от интервалов времени, в которые они реализуются. Такая организация средств деятельности, в том числе СОИ, обеспечит поддержание оптимальной политики оператора, соответствующей среднему максимальному системному выигрышу за один шаг. Для нахождения такой политики можно воспользоваться итеративным процессом. Предварительно отметим следующее. Если политика оператора фиксирована, то, подставив соотношение (11) в уравнение (5), получим

$$g + v_i = q_i + \sum p_{ij} v_j, \qquad (12)$$

т. е. систему уравнений, имеющую одну степень свободы, относительно g и v_i. Если в критерий (6) подставить соотношение (11), то получим

$$q_i^k + \sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k (ng + v_j) \underset{k=1\ldots\Delta_i}{\rightarrow \max \rightarrow} q_i^k + ng +$$

$$+ \sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k v_j \underset{k=1\ldots\Delta_i}{\rightarrow \max \rightarrow} q_i^k + \sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k v_j \underset{k=1\ldots\Delta_i,}{\rightarrow \max} \quad i = 1 \ldots N. \qquad (13)$$

Такова общая процедура расчета критерия оценки стратегий при фиксированных v_i. Итеративный процесс осуществляется следующим образом. При фиксированной политике A решается система уравнений (12), причем в ней v_N полагается равным нулю (поскольку нам важны разности $v_i - v_j$ относительных весов, а не их абсолютные значения). Затем найденные веса v_i^A подставляются в критерий (13), максимальное значение критерия находится для каждого i, и набор стратегий, на котором достигается максимальное среднее значение критерия, принимается за новую политику. Сходимость итеративного процесса достигается, если на каждой итерации прибыль процесса по крайней мере не убывает. Вообще же Р. Ховард [139] доказал, что такой процесс не может сходиться к неоптимальной политике.

Теперь перейдем к рассмотрению моделей оптимальных единичных решений, стратегий и политик оператора в случае, когда время принятия отдельных решений колеблется в широких пределах (например, при инструкции испытуемому, в которой особо оговаривается достижение точного решения). К такой задаче наиболее подходит аппарат математической теории полумарковских цепей. Полумарковский процесс с дискретными временными интервалами задается следующим образом. Имеется система с N состояниями. Переходы из одного состояния в другое осуществляются в соответствии с матрицей переходных вероятностей $P = \| p_{ij} \|$, причем $p_{ij} \geqslant \geqslant 0$ и $\sum_{j=1}^{N} p_{ij} = 1$ для всех i. В отличие от марковского процесса при полумарковском процессе система перед тем, как перейти из состояния i в состояние j, проводит в состоянии i случайное время $\tau_{ij} = m$ с плотностью распределения $h_{ij}(m) = N(\tau_{ij} = m)$. Полагаем $h_{ij}(0) = 0$, т. е. процесс должен провести в состоянии i хотя бы единицу времени, прежде чем перейти в j. Величина τ_{ij} — это время принятия и реализации единичного решения, т. е. время перехода системы из начального состояния i в заранее известное новое состояние j. Значением $h_{ij}(m)$ определяется вероятность того, что система в состоянии i проводит ровно m единиц времени, прежде чем перейти в состояние j. Математическое ожидание времени принятия и реализации единичного решения есть среднее время, которое система проводит в состоянии i, прежде чем перейти в последующее состояние j:

$$\bar{\tau}_{ij} = \sum_{m=0}^{\infty} m h_{ij}(m).$$

Наряду с τ_{ij} полезно ввести время принятия единичного решения τ_i для исходного состояния i, когда новое состояние системы заранее не известно. Равенство $\tau_i = m$ означает, что система проведет ровно m единиц времени в состоянии i, прежде

чем из него выйти, причем неважно, какое будет последующее состояние. Плотность распределения τ_i обозначим через $\omega_i(m)$:

$$\omega_i(m) = N(\tau_i = m) = \sum_{j=1}^{N} p_{ij} h_{ij}(m);$$

математическое ожидание τ_i есть

$$\bar{\tau}_i = \sum_{m=0}^{\infty} mN(\tau_i = m) = \sum_{m=0}^{\infty} m \sum_{j=1}^{N} p_{ij} h_{ij}(m) =$$

$$= \sum_{j=1}^{N} p_{ij} \sum m h_{ij}(m)$$

или

$$\bar{\tau}_i = \sum_{j=1}^{N} p_{ij} \bar{\tau}_{ij}.$$

Введем обозначения:

$$^{\leqslant}h_{ij}(n) = \sum_{m=0}^{n} h_{ij}(m) = N(\tau_{ij} \leqslant n)$$

— вероятность того, что процесс пробудет в состоянии i время, не большее n, до того как перейти в j;

$$^{>}h_{ij}(n) = \sum_{m=n+1}^{\infty} h_{ij}(m) = 1 - {}^{\leqslant}h_{ij}(n) = N(\tau_{ij} > n)$$

— вероятность того, что процесс проведет в состоянии i время, большее n, прежде чем перейти в j;

$$^{\leqslant}\omega_i(n) = \sum_{m=0}^{n} \omega_i(m) = \sum_{m=0}^{n} \sum_{j=1}^{N} p_{ij} h_{ij}(m) =$$

$$= \sum_{j=1}^{N} p_{ij} {}^{\leqslant}h_{ij}(n) = N\{\tau_i \leqslant n\}$$

— вероятность того, что процесс выйдет из состояния i не позже чем через n единиц времени после того, как он попал в это состояние;

$$^{>}\omega_i(n) = \sum_{m=n+1}^{\infty} \omega_i(m) = \sum_{j=1}^{N} p_{ij} {}^{>}h_{ij}(n) = N(\tau_i > n)$$

— вероятность того, что процесс пробудет в состоянии i не меньше n единиц времени, прежде чем из него выйти. В дальнейшем нам потребуется понятие вероятности перехода системы, находившейся в начальный момент 0 в состоянии i, в состояние j в момент времени n. Такую переходную вероятность обозначим $\Phi_{ij}(n)$. Тогда предельная вероятность попадания системы в состояние j из i через длительный промежуток времени выразится как

$$\Phi_{ij} = \lim_{n\to\infty} \Phi_{ij}(n).$$

Известно, что в моменты переходов полумарковский процесс ведет себя в точности так же, как марковский; существенное отличие определяется переменным временем пребывания системы в каждом состоянии. Поэтому наряду с введенным ранее для марковских процессов системным выигрышем b_{ij} от перехода системы из i в j будем рассматривать еще и выигрыш $y_{ij}(l)$ от пребывания системы в данном состоянии i в течение временного интервала $(l-1,\ l)$ пропорционально некоторой норме выигрыша за единицу времени. Таким образом, если система попала в состояние i, провела в нем время $\tau_{ij}=m$ и затем перешла в состояние j, то полный выигрыш (доход), который она при этом получит, есть

$$b_{ij}(m)+\sum_{l=0}^{m-1} y_{ij}(l).$$

Очевидно, что b_{ij} и y_{ij} могут быть и положительными, и отрицательными действительными числами. Отрицательный выигрыш можно было бы называть штрафом.

Используя методы динамического программирования, запишем рекуррентное соотношение для полного ожидаемого дохода $v_i(n)$ от процесса, который начался из состояния i и до конца которого осталось n единиц времени:

$$v_i(n)=\sum_{j=1}^{N} p_{ij}\sum_{m=n+1}^{\infty} h_{ij}(m)\left[\sum_{l=0}^{n-1} y_{ij}(l)+v_i(0)\right]+$$

$$+\sum_{j=1}^{N} p_{ij}\sum_{m=0}^{n} h_{ij}(m)\left[\sum_{l=0}^{m-1} y_{ij}(l)+b_{ij}(m)+v_j(n-m)\right]; \qquad (14)$$

или в другом виде

$$v_i(n)=\sum_{j=1}^{N} p_{ij}\sum_{m=n+1}^{\infty} h_{ij}(m)\sum_{l=0}^{n-1} y_{ij}(l)+\sum_{j=1}^{N} p_{ij}\sum_{m=n+1}^{\infty} h_{ij}(m)\,v_i(0)+$$

$$+\sum_{j=1}^{N} p_{ij}\sum_{m=0}^{n} h_{ij}(m)\left[\sum_{l=0}^{m-1} y_{ij}(l)+b_{ij}(m)\right]+$$

$$+\sum_{j=1}^{N} p_{ij}\sum_{m=0}^{n} h_{ij}(m)\,v_j(n-m). \qquad (15)$$

Первое слагаемое выражения (15) обозначим через $>y_i\ (n,\beta)$, второе — через $v\ (0)>\omega_i\ (n)$, третье — через $r_i\ (n)$, рассматривая два случая:

а) когда система до конца процесса, т. е. до момента n, не выходит из состояния i, в которое она попала в момент 0;

б) когда система, попавшая в состояние i в момент 0, выйдет из него в момент m $(m\leqslant n)$.

Второй случай отражен в соотношении (14) для приведенного полного ожидаемого дохода $v_i\ (n)$ от процесса, до конца

функционирования которого осталось n единиц времени, при начальном состоянии i. Тогда выражение (15) принимает вид

$$v_i(n) = {}^{>}y_i(n, \beta) + v(0)\,{}^{>}w_i(n) + r_i(n) +$$

$$+ \sum_{j=1}^{N} p_{ij} \sum_{m=0}^{n} h_{ij}(m)\, v_j(n-m).$$

Если политика принятия решений оператором описывается как полумарковский процесс, то выбор оптимальной стратегии K в состоянии i может быть осуществлен на основе анализа переходных вероятностей p_{ij}^k, плотности распределения $h_{ij}^k(m)$, а также системных выигрышей типа $y_{ij}^k(l)$ и $b_{ij}^k(m)$. Как и в предыдущем случае марковских процессов, будем рассматривать полумарковские процессы конечной и бесконечной длительности. В первом случае задача состоит в определении политики оператора, максимизирующей полный ожидаемый выигрыш от процесса, до конца функционирования которого осталось n единиц времени. В случае процессов бесконечной длительности задача может быть сформулирована либо как задача максимизации одношагового выигрыша (аналогично задаче для марковских процессов бесконечной длительности), либо как задача максимизации полного ожидаемого дохода. В общем виде можно оперировать критерием, получаемым в соответствии с принципом оптимальности Беллмана:

$$v_i^*(n) = \max_k \left\{ \sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k \sum_{m=n+1}^{\infty} h_{ij}^k(m) \left[\sum_{l=0}^{n-1} y_{ij}^k(l) + v_i(0) \right] + \right.$$

$$\left. + \sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k \sum_{m=0}^{n} h_{ij}(m) \left[\sum_{l=0}^{m-1} y_{ij}^k(l) + b_{ij}^k(m) + v_j(n-m) \right] \right\},$$

где $i = 1, \ldots, N$; $n = 1, 2, 3, \ldots$

Последовательно решая это рекуррентное соотношение при заданном $v_i(0)$, можно найти оптимальную политику оператора. Если провести анализ соотношений (14) и (15) с помощью геометрического преобразования, аналогично анализу полных ожидаемых доходов марковских процессов, то мы получим следующие соотношения: асимптотический вид полного ожидаемого дохода $v_i(n, 1)$ при больших n

$$v_i(n, 1) = g_i n + v_i, \quad i = 1, \ldots, N,$$

причем относительные веса v_i в полумарковском процессе имеют ту же природу, что и в марковском, а именно, разность $v_i - v_j$ показывает различие между полными ожидаемыми доходами при длительном функционировании системы, обусловленное тем, что процесс начался из состояния системы i, а не j.

В ходе анализа с помощью геометрических преобразований для одношаговой прибыли процесса получается следующее выражение:

$$g_i = \sum_{i=1}^{N} \Phi_{ij} \frac{r_j}{\bar{\tau}_j}.$$

Пусть r_i — вклад в полный ожидаемый доход от процесса (b_{ij} и y_{ij}), полученный системой до момента ее первого выхода из состояния i, независимо от того, как долго она в этом состоянии пробудет. Тогда r_i есть средний ожидаемый доход от пребывания системы в состоянии i и ухода из этого состояния при длительном функционировании процесса.

По определению

$$r_i = r_i(1) = r_i(\infty, 1) = \lim_{n \to \infty} r_i(n, 1);$$

$$r_i(n, 1) = \sum_{j=1}^{N} p_{ij} \sum_{m=0}^{n} h_{ij}(m) \left[\sum_{l=0}^{m-1} y_{ij}(l) + b_{ij}(m) \right],$$

откуда следует

$$r_i = \sum_{j=1}^{N} p_{ij} \sum_{m=0}^{\infty} h_{ij}(m) \left[\sum_{l=0}^{m-1} y_{ij}(l) + b_{ij}(m) \right].$$

Обозначим $q_j = \frac{r_j}{\bar{\tau}_j}$. Напомним, что $\bar{\tau}_j$ есть среднее время, которое процесс проводит в состоянии j, прежде чем из него выйти, независимо от того, в какое состояние он перейдет в следующий момент времени, тогда q_j показывает, каков средний доход от пребывания в состоянии j в течение единицы времени при длительном функционировании системы. Прибыль процесса при условии начального состояния i есть $g_i = \sum_{j=1}^{N} \Phi_{ij} q_j$, где Φ_{ij} — предельная вероятность состояния при условии, что система стартует из состояния i. Для процессов с одним эргодическим классом Φ_{ij} не зависит от начального состояния i, т. е. $\Phi_{ij} = \Phi_j$ для всех i, и, следовательно, прибыль одинакова для всех состояний процесса. Таким образом, имеет место равенство

$$g = \sum_{j=1}^{N} \Phi_j q_j = \sum_{j=1}^{N} \Phi_j \frac{r_j}{\bar{\tau}_j}.$$

Анализ с помощью геометрического преобразования приводит к системе уравнений

$$v_i + g\bar{\tau}_i = r_i + \sum_{j=1}^{N} p_{ij} v_j, \; i = 1, \ldots, N. \qquad (16)$$

С помощью системы уравнений (16) задается политика оператора. Система имеет одну степень свободы, ее можно решить относительно g; $v_1, \ldots, v_{N-1}$, положив $v_N = 0$. Решив систему уравнений (16) относительно g, получим:

$$g = \frac{r_i}{\bar{\tau}_i} + \frac{1}{\bar{\tau}_i}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}v_j - v_i\right];$$

$$g = q_i + \frac{1}{\bar{\tau}_i}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}v_j - v_i\right], \quad i = 1, \ldots, N. \tag{17}$$

Для нахождения оптимальной политики, в смысле максимизации одношаговой прибыли процесса, т. е. среднего ожидаемого дохода за единицу времени, применяется итеративный процесс, начинающийся с произвольной политики оператора. Для этой политики решаем систему уравнений (16):

$$v_i + g\bar{\tau}_i = q_i\,\bar{\tau}_i + \sum_{j=1}^{N} p_{ij}v_j, \quad i = 1, \ldots, N;$$

затем выполняется процедура улучшения решения и определяются относительные веса v_i. Для всех i находим стратегию, максимизирующую критерий:

$$\Gamma_i^k = q_i^k + \frac{1}{\bar{\tau}_i^k}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k v_j - v_i\right] \to \max. \tag{18}$$

Набор стратегий, найденных таким образом, принимается за новую политику оператора, и начинается следующая итерация.

Р. Ховард [139] приводит доказательство сходимости итеративного процесса.

Пусть

$$\Gamma_i^{BA} = q_i^B + \frac{1}{\bar{\tau}_i^B}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}^B v_j^A - v_i^A\right] = \max_k q_i^k + \frac{1}{\bar{\tau}_i^k}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k v_j^A - v_i^A\right],$$

т. е. Γ_i^{BA} есть значение критерия для политики B, полученной в результате процедуры улучшения решения при относительных весах, соответствующих политике A.

Попутно необходимо доказать, что

$$g^B = \sum_{i=1}^{N} \Phi_i^B \Gamma_i^{BA}. \tag{19}$$

Запишем соотношение (17) для политики B:

$$g^B = q_i^B + \frac{1}{\tau_i^B}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}^B v_j^B - v_i^B\right],\ i=1,\ \ldots,\ N, \tag{20}$$

$$g^B = \sum_{i=1}^{N} \Phi_i^B q_i^B.$$

Тогда

$$\Gamma_i^{BA} = q_i^B + \frac{1}{\tau_i^B}\left[\sum_{i=1}^{N} p_{ij}^B v_j^A - v_i^A\right],\ i=1,\ \ldots,\ N. \tag{21}$$

Вычтем уравнение (21) из уравнения (20), получим

$$g^B = \Gamma_i^{BA} + \frac{1}{\tau_i^B}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}^B (v_j^B - v_j^A) - (v_i^B - v_i^A)\right]. \tag{22}$$

Обозначив $\Delta v_j = v_j^B - v_j^A$, можно переписать выражение (22) в виде

$$g^B = \Gamma_i^{BA} + \frac{1}{\tau_i^B}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}^B \Delta v_j - \Delta v_i\right]. \tag{23}$$

Сравнивая уравнения (21) и (23), заметим, что второе отличается от первого лишь тем, что q_i^B заменены на Γ_i^{BA}. Принимая во внимание условие (20), можно записать решение уравнения (23) в виде

$$g^B = \sum_{i=1}^{N} \Phi_i^B \Gamma_i^{BA},$$

что и требовалось доказать в исходном уравнении (19).

Теперь нетрудно доказать сходимость итеративного процесса. Во-первых, покажем, что на каждой итерации прибыль по крайней мере не убывает. По этому поводу Р. Ховард [139] отметил, что

$$\Gamma_i^{AA} = q_i^A + \frac{1}{\tau_i^A}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}^A v_j^A - v_i^A\right] = g^A.$$

Если B есть политика, полученная в результате процедуры улучшения решения, то из выражения (21) следует, что $\Gamma_i^{BA} \geqslant \Gamma_i^{AA} = g^A$ для всех i, а по крайней мере для одного состояния i

$$\Gamma_i^{BA} > \Gamma_i^{AA}, \tag{24}$$

если политики A и B не совпадают. Поэтому, если по крайней мере одно из состояний i, для которых выполняется условие (24), приходится системой по политике B, то

$$g^B = \sum_{i=1}^{N} \Phi_i^B \Gamma_i^{BA} > \sum_{i=1}^{N} \Phi_i^B g^A \tag{25}$$

или

$$g^B > g^A, \quad A \neq B. \tag{26}$$

Следовательно, при выполнении процедуры улучшения решения прибыль процесса возрастает, если изменение политики происходит в состоянии, для которого выполняются условия (25) и (26).

Покажем также, что итеративный процесс не может сходиться к неоптимальной политике. Доказательство проводится методом от противного. Предположим, что итеративный процесс сходится к политике A, но существует такая политика B, что

$$g^B > g^A. \tag{27}$$

Поскольку политика A получена в ходе итеративного процесса, то на ней достигается максимум (18):

$$g^A = q_i^A + \frac{1}{\tau_i^A}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}^A v_j^A - v_i^A\right] = \max_k q_i^k +$$

$$+ \frac{1}{\bar{\tau}_i^k}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k v_j^A - v_i^A\right] \geqslant q_i^B + \frac{1}{\bar{\tau}_i^B}\left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}^B v_j^A - v_i^A\right] = \Gamma_i^{BA}.$$

Таким образом, $g^A \geqslant \Gamma_i^{BA}$, но поскольку имеет место условие (19), получаем

$$g^B = \sum_{i=1}^{N} \Phi_i^B \Gamma_i^{BA} \leqslant \sum_{i=1}^{N} \Phi_i^B g^A = g^A,$$

т. е. $g^B \leqslant g^A$, что противоречит условию (27).

Таким образом, изложенные методы и для постоянного времени принятия оператором единичных решений (марковские процессы), и для переменного случайного времени (полумарковские процессы) позволяют находить оптимальную в смысле максимизации суммарного (или среднего) системного выигрыша политику оператора и на этой основе производить сравнительную оценку различных по структуре информационных моделей, обусловливающих тенденцию выбора разных вариантов политик, и ставить вопрос о причинах их отличия от найденной оптимальной политики в решении оперативных задач.

7

Результаты экспериментов и анализ статистических связей между факторами и критериями сложности задач

Перейдем к исследованию влияния факторов сложности задач на эффективность и психологическую структуру процессов решения оперативных задач по мнемосхеме. В данной серии экспериментов применялась описанная выше методика со следующими уточнениями.

Испытуемый помещался в изолированной электрофизиологической камере. Положение головы испытуемого фиксировалось специальным подборником. В ходе эксперимента на комплексе электрофизиологической аппаратуры «Орион», состоящем из восьмиканального электроэнцефалографа, анализатора и интегратора биотоков, регистрировались вертикальная и горизонтальная составляющие электроокулограммы (ЭОГ) и электроэнцефалограмма (ЭЭГ) затылочной области коры головного мозга с выделением α-ритма. На рис. 5 показан фрагмент диаграммы электроэнцефалографа. Речевые ответы испытуемых записывались на магнитофоне.

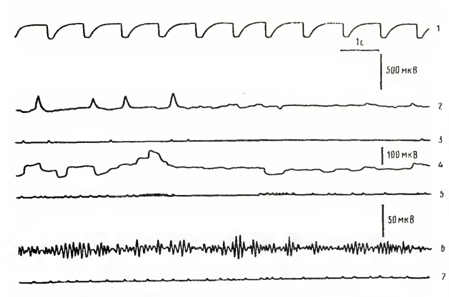
В каждом опыте испытуемый решал 11 задач. Условие очередной задачи сообщалось испытуемому, после чего предъявлялась мнемосхема в виде цветного плаката с угловыми размерами 30×20 град, на котором отображалось состояние объекта, соответствующее данной задаче.

Испытуемый должен был оценить ситуацию, принять решение и затем сообщить перечень операций по изменению состояния объекта для нормализации его режима. В общей инструкции испытуемым было указано, что главное — обстоятельно оценить ситуацию, принимать точное, безошибочное решение. Время решения измерялось от момента предъявления мнемосхемы до начала ответа. Результат решения, ошибки и число названных переключений выявлялись при анализе ответов. Эти данные, усредненные по всем испытуемым, приведены в табл. 4.

Фазами решения с точки зрения характеристик сенсорной деятельности условно названы чередующиеся периоды, характеризующиеся относительно постоянными параметрами ЭОГ — длительностью фиксаций и амплитудой скачков глаз.

По предложению В. М. Гордон, выделено четыре типа фаз со следующими характеристиками:

1. Малая длительность фиксаций и малые амплитуды скачков: $t_ф < 1$ с и амплитуда скачков 3—7°, эта фаза обозначена $t_{фм}a_м$. Суммарная длительность таких фаз при решении задачи обозначена в расчетах через Q.



5 *Фрагмент диаграммы электроэнцефалографа:*

1 — отметки времени; *2* — ЭОГ — вертикальная составляющая; *3* — интегрированные сигналы вертикальной составляющей ЭОГ; *4* — ЭОГ — горизонтальная составляющая; *5* — интегрированный сигнал горизонтальной составляющей ЭОГ; *6* — ЭЭГ — α-ритм; *7* — интегрированные сигналы α-ритма

2. Кратковременные фиксации $t_ф < 1$ с, амплитуда скачков 10—15°; эта фаза обозначена $t_{фм}a_б$, а ее длительность P.

3. Длительные фиксации $t_ф > 1$ с, амплитуда скачков различная, обозначение фазы $t_{фб}$, ее длительности Z.

4. Малоамплитудный дрейф глаз $a \approx 0$, эта фаза микродвижений глаз $t_ф \gg 1$ с, длительность этой фазы обозначена Ф.

В некоторых случаях в расчетах учитывалась длительность начальной фазы — фазы ознакомления с ситуацией (T) и заключительной фазы (Y) — проверки и формулирования решения.

Наряду с указанными характеристиками фаз ЭОГ в табл. 4 применены также следующие обозначения: t — время решения задачи; R — средняя длительность фиксации глаз при решении задачи; M — число фаз решения по ЭОГ; N — условный комплексный критерий сложности решения ($N = t\xi M$).

Полный массив экспериментальных данных по показателям процессов решения задач, средние величины которых приведены в табл. 4, был подвергнут статистической обработке.

В качестве критериев (экспериментальных показателей) сложности процессов решения различных задач приняты: время решения (t), число ошибок, допущенных испытуемыми (ξ), число фаз процесса решения (M), средняя длительность фиксаций (R), а также комплексный критерий $N = t\xi M$.

Таблица 4

Средние значения показателей процессов решения оперативных задач

№ задачи	Время решения, с	Число ошибок	Длительность фазы ознакомления, с	Длительность фазы $t_{фм}a_б$, с	Длительность фазы $t_{фм}a_м$, с	Длительность фазы $t_{фб}$, с	Число фаз	Комплексный критерий	Длительность фиксаций, с
	t	ξ	T	P	Q	Z	M	N	R
1	144	4,5	19	63	27	46	10,7	7750	1,55
2	70	2,2	10	13	17	27	5,2	705	1,35
3	67	1,0	22	20	18	6	4,3	65	0,47
4	52	1,2	15	18	17	11	3,7	485	1
5	64	0,6	11	34	9	19	4,8	242	1,25
6	73	1,0	26	27	18	11	3,5	261	1,05
7	53	1,4	13	13	24	10	3	257	0,82
8	64	2,7	11	18	23	18	4,6	520	1,12
11	85	0,4	12	24	22	28	7,8	785	1,3
12	130	3,3	13	43	53	16	8,8	2975	0,9
14	90	1,2	12	21	11	17	5,2	145	1,4

С целью дополнительного анализа критерия M как показателя числа различных способов действий испытуемых фазы, выделенные по амплитуде скачков и длительности фиксаций, были сопоставлены также по числу миганий в единицу времени и по активности центрального отдела зрительной системы. Данные показали, что фазы T, $t_{фм}a_б$ и $t_{фм}a_м$ по частоте миганий не различаются, здесь она наибольшая. В периоды длительных фиксаций $t_{фб}$ частота миганий несколько снижается и при полной депрессии движений глаз в фазе Ф становится наименьшей.

Анализ активности центрального отдела зрительной системы проводился по данным регистрации α-ритма за 5 с: 1) перед сообщением условий очередной задачи и предъявлением мнемосхемы (начальный — 1-й фон); 2) в ходе решения и 3) по окончании решения, после речевого ответа (конечный — 2-й фон).

В табл. 5 приведены вероятности наличия различных фаз в процессах решения задач в 1-й и 2-й экспериментальных сериях и средние вероятности по обеим сериям. Частота фазы Q остается постоянной. Вероятность наличия фазы z при обучении снижается (0,79 и 0,61), а фазы P увеличивается (0,43 и 0,58). Это может быть объяснено тем, что при повторении оперативных задач некоторые алгоритмы решения формируются уже в ходе ознакомления с ситуацией.

Частота фазы Ф остается примерно постоянной. Было выдвинуто предположение, что наличие фазы Ф свидетельствует о высокой сложности решения задачи. Это подтвердилось сопоставлением средних показателей процессов решения

задач, в которых присутствовала фаза Ф, и показателей процессов без этой фазы: в первом случае число ошибок было вдвое, а среднее время решения в 1,6 раза больше, чем во втором.

Таблица 5

Вероятности наличия различных фаз в процессах решения задач

Серии опытов	Вероятности наличия различных фаз			
	$p(P)$	$p(Q)$	$p(Z)$	$p(\Phi)$
1-я	0,43	0,54	0,79	0,20
2-я	0,57	0,54	0,61	0,24
Средние по двум сериям	0,5	0,54	0,7	0,22

Теперь перейдем к анализу влияния факторов, обусловливающих сложность задач, на процесс и результаты их решения. В процессе анализа нами широко применялись методы статистического (в том числе корреляционного и регрессионного) анализа экспериментальных данных на ЭВМ.

Для начала рассмотрим связи между отдельными факторами.

Из корреляционной матрицы парных связей факторов K_{jP} (см. табл. 6) видно, что статистические связи между факторами весьма тесны. Отсюда следует, что могут быть найдены такие методы построения СОИ, которые позволяют снизить реальные значения сразу целых групп факторов K_{jP}. С другой стороны, увеличение одного или нескольких факторов вследствие несовершенства структуры отображения информации часто приводит к увеличению и других факторов, а следовательно с большой вероятностью — общему усложнению задачи, реально возникающей перед оператором. Из табл. 7 видно, что коэффициенты корреляции факторов K_{jP} и таких показателей сложности, как t, ξ и N — соответственно $r_{tK_{jP}}$, $r_{\xi K_{jP}}$ и $r_{NK_{jP}}$, как правило, положительны и имеют большие абсолютные значения. Исключение составляют факторы K_{4P}, K_{7P}, K_{8P}, K_{13P}, K_{14P}. В таблице приведены не только средние значения коэффициентов корреляции $(\bar{r})$, но и их верхние $(r_{в})$ и нижние $(r_{н})$ значения при доверительной вероятности $p_{дов} = 0,9$.

Отрицательное значение $r_{tK_{4P}}$, $r_{\xi K_{4P}}$ и $r_{NK_{4P}}$, видимо, объясняется в данных экспериментах тем, что увеличение избытка информации при постоянном СОИ и числе его элементов одновременно означало уменьшение числа элементов и их связей, относящихся к задаче, а следовательно, в большинстве случаев — и упрощение задачи. Однако весьма показательно, что абсолютные значения этих коэффициентов малы, в то время

Таблица 6

Корреляционная матрица парных связей факторов K_{jP}

K_{jP}	K_{1P}	K_{2P}	$K_{3P}^{п}$	$K_{3P}^{к}$	K_{4P}	K_{5P}	K_{6P}	K_{7P}	K'_{7P}	K_{8P}	K_{10P}	K_{13P}	K_{14P}	K_{15P}
K_{1P}	1	0,82	0,77	0,94	—0,54	0,91	0,83	0,79	0,80	0,81	0,88	0,64	0,41	0,69
K_{2P}		1	0,51	0,87	—0,64	0,68	0,50	0,51	0,81	0,88	0,81	0,69	0,36	0,62
$K_{3P}^{п}$			1	0,54	—0,43	0,80	0,86	0,50	0,47	0,49	0,67	0,18	—0,04	0,27
$K_{3P}^{к}$				1	—0,57	0,79	0,63	0,47	0,81	0,86	0,85	0,78	0,49	0,7
K_{4P}					1	—0,43	—0,31	—0,84	—0,5	—0,66	—0,69	—0,31	—0,07	—0,24
K_{5P}						1	0,9	0,48	0,85	0,79	0,84	0,59	0,49	0,72
K_{6P}							1	0,36	0,62	0,52	0,68	0,25	0,33	0,61
K_{7P}								1	0,42	0,53	0,62	0,16	0,14	0,22
K'_{7P}									1	0,94	0,87	0,81	0,67	0,86
K_{8P}										1	0,91	0,84	0,50	0,7
K_{10P}											1	0,66	0,47	0,69
K_{13P}												1	0,56	0,63
K_{14P}													1	0,88
K_{15P}														1

Таблица 7

Коэффициенты парной корреляции характеристик ЭОГ, показателей эффективности решения и реальных значений факторов сложности задач (с доверительными интервалами при $p_{дов} = 0,9$)

Факторы K_{jP}	Характеристики глазодвигательного поведения											
	$r_{TK_{jP}}$			$r_{PK_{jP}}$			$r_{QK_{jP}}$			$r_{zK_{jP}}$		
	$\bar{r}$	$r_в$	$r_н$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_н$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_н$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_н$
K_{1P}	0,05	0,14	—0,17	0,69	0,78	0,59	0,49	0,61	0,34	0,51	0,64	0,41
K_{2P}	—0,26	—0,42	—0,09	0,42	0,55	0,26	0,27	0,49	0,10	0,27	0,42	0,12
$K_{3P}^{п}$	0,24	0,39	0,06	0,88	0,93	0,79	0,28	0,52	0,13	0,70	0,78	0,59
$K_{3P}^{к}$	—0,17	—0,33	—0,02	0,43	0,56	0,27	0,40	0,54	0,25	0,34	0,48	0,18
K_{4P}	—0,42	—0,55	—0,25	—0,19	—0,38	—0,05	—0,11	0,28	0,02	0,06	0,15	—0,21
K_{5P}	0,06	0,17	—0,13	0,80	0,85	0,72	0,51	0,63	0,32	0,46	0,61	0,32
K_{6P}	0,09	0,26	—0,08	0,92	0,96	0,85	0,59	0,75	0,38	0,60	0,77	0,41
K_{7P}	0,45	0,58	0,30	0,28	0,41	0,10	0,09	0,27	—0,06	0,07	0,23	—0,15
K'_{7P}	—0,11	—0,29	0,04	0,52	0,64	0,41	0,48	0,60	0,34	0,05	0,14	—0,17
K_{8P}	—0,07	—0,25	0,09	0,41	0,55	0,26	0,26	0,40	0,08	0,05	0,14	—0,17
K_{10P}	0,13	0,31	0	0,57	0,68	0,43	0,38	0,51	0,21	0,13	0,30	0,03
K_{13P}	—0,26	—0,40	—0,07	0,10	0,27	—0,02	0,20	0,37	0,04	0	0,22	—0,27
K_{14P}	—0,09	—0,26	0,08	0,12	0,31	0,05	0,73	0,80	0,64	—0,23	—0,42	—0,03
K_{15P}	0,22	0,37	0,02	0,46	0,61	0,29	0,77	0,85	0,69	0,75	0,83	0,68

Факторы $K_{jР}$	Характеристики глазодвигательного поведения			Показатели эффективности						Комплексный критерий		
	$r_{MK_{jР}}$			$r_{tK_{jР}}$			$r_{\xi K_{jР}}$			$r_{NK_{jР}}$		
	$\bar{r}$	$r_в$	$r_и$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_и$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_н$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_и$
$K_{1Р}$	0,67	0,75	0,51	0,80	0,88	0,69	0,76	0,83	0,69	0,79	0,87	0,66
$K_{2Р}$	0,41	0,54	0,26	0,56	0,67	0,43	0,31	0,49	0,13	0,42	0,55	0,27
$K_{3Р}^{п}$	0,77	0,84	0,70	0,81	0,86	0,74	0,64	0,72	0,51	0,93	0,96	0,88
$K_{3Р}^{к}$	0,46	0,61	0,29	0,62	0,72	0,51	0,62	0,69	0,46	0,56	0,67	0,44
$K_{4Р}$	0,02	0,12	—0,08	—0,25	—0,42	—0,04	—0,12	—0,29	0,02	—0,26	—0,41	—0,11
$K_{5Р}$	0,67	0,77	0,55	0,80	0,85	0,72	0,75	0,81	0,65	0,82	0,87	0,74
$K_{6Р}$	0,78	0,86	0,71	0,86	0,91	0,77	0,84	0,89	0,73	0,93	0,96	0,88
$K_{7Р}$	0,07	0,25	—0,09	0,34	0,48	0,19	0,26	0,52	0,11	0,35	0,49	0,20
$K'_{7Р}$	0,40	0,55	0,26	0,59	0,75	0,39	0,42	0,55	0,27	0,43	0,54	0,27
$K_{8Р}$	0,28	0,52	0,13	0,48	0,60	0,34	0,33	0,48	0,18	0,38	0,52	0,23
$K_{10Р}$	0,39	0,52	0,23	0,63	0,71	0,49	0,53	0,65	0,47	0,58	0,69	0,43
$K_{13Р}$	0,20	0,37	0,06	0,3	0,47	0,09	0,26	0,42	0,05	0,16	0,35	0,09
$K_{14Р}$	0,14	0,32	0,03	0,31	0,49	0,12	0,58	0,67	0,48	0,11	0,30	0,01
$K_{15Р}$	0,42	0,55	0,27	0,6	0,77	0,41	0,55	0,66	0,41	0,57	0,69	0,46

как, если сопоставить $r_{K_{4P}K_{1P}}$, $r_{K_{7P}t}$, а также $r_{K_{1P}t}$, $r_{K_{7P}t}$, $r_{K_{1P}\xi}$, $r_{K_{7P}\xi}$, можно было ожидать большего снижения сложности задач при увеличении K_{4P}. Возможно, что наряду с естественным упрощением задач при возрастании K_{4P} из-за уменьшения числа значимых связей и оперативных элементов происходит и некоторое усложнение процесса решения задач из-за увеличения доли иррелевантной информации на мнемосхеме, так что в целом снижение сложности задачи небольшое.

Необходимо исследовать особо влияние избытка информации на показатели деятельности операторов с мнемосхемами. В таких экспериментах должен существенно изменяться состав информации об объекте, отображаемой на мнемосхеме при разных оперативных задачах.

Малое значение $r_{tK_{14P}}$ и $r_{NK_{14P}}$, по-видимому, является следствием несовершенства выбранного способа оценки коэффициента маскировки связей на мнемосхеме. Необходимо применять более обстоятельные качественные методы оценки структуры мнемосхемы, в том числе методы анализа компоновки и композиции мнемосхем (вариант такого метода рассматривается нами в гл. 9).

Характерна разница в коэффициентах корреляции показателей деятельности с K_{13P} и K_{15P}. Важно не столько общее число конкурирующих вариантов решения, сколько степень замаскированности верного искомого решения неверными — более вероятными и бросками. Явление интерференции сходно по психологической структуре с явлением ослабленного воздействия нового опыта на распределение субъективных вероятностей по сравнению с оптимальным воздействием, определяемым формулой Байеса. Такая склонность человека к осторожной оценке новых сведений и тяготение к более привычным, априорно вероятным данным названа Эдвардсом [135] «консерватизмом».

Наиболее сильно влияют на показатели деятельности операторов следующие факторы: K_{1P}, $K_{3P}^{\text{п}}$, K_{5P}, K_{6P}, а также $K_{3P}^{\text{к}}$ и K_{10P}, отражающие число и состав связей между элементами условий задачи и число операций в алгоритмах поиска и реализации решения. Интересно сравнить статистические связи реальных значений факторов (K_{jP}) с показателями деятельности со связями теоретических значений факторов (K_{jT}) с этими же показателями.

В табл. 8 приведены значения коэффициентов корреляции показателей деятельности операторов и теоретических значений факторов сложности задач K_{jT}. Смысл K_{jT} — это условный уровень сложности задачи при отображении ее исходных данных на идеальном СОИ, когда сложность определяется только собственной структурой задачи и отсутствуют «шумы» в системе передачи информации.

Таблица 8

Коэффициенты парной корреляции характеристик ЭОГ, показателей эффективности решения и теоретических значений факторов сложности задач с K_{jT} (с доверительными интервалами при $p_{дов} = 0{,}9$)

Факторы $K_{jТ}$	Характеристики глазодвигательного поведения											
	$r_{TK_{jT}}$			$r_{PK_{jT}}$			$r_{QK_{jT}}$			$r_{ZK_{jT}}$		
	$\bar{r}$	$r_в$	$r_н$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_н$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_н$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_н$
$K_{1Т}$	—0,16	—0,32	—0,02	—0,24	—0,43	—0,07	0,15	0,31	0,03	—0,18	—0,34	—0,07
$K_{2Т}$	—0,33	—0,48	—0,18	—0,27	—0,43	—0,11	—0,4	—0,55	—0,27	0,21	0,40	0,09
$K_{3Т}^{П}$	0,2	0,35	0,01	0,2	0,36	0,09	—0,23	—0,42	—0,07	0,17	—0,08	0,15
$K_{3Т}^{К}$	—0,24	—0,39	—0,06	—0,14	—0,30	0	0,09	0,26	—0,08	0,24	0,43	0,07
$K_{4Т}$	—0,31	—0,46	—0,16	0,50	0,63	0,32	—0,16	—0,32	—0,02	0	0,22	—0,27
$K_{5Т}$	0,21	0,40	0,04	0,85	0,89	0,74	0,46	0,60	0,34	0,53	0,65	0,77
$K_{6Т}$	0,22	0,42	0,03	0,89	0,93	0,77	0,39	0,53	0,24	0,63	0,72	0,51
$K_{7Т}$	0,23	0,43	0,05	0,76	0,81	0,65	0,39	0,54	0,28	0,25	0,42	0,04
$K'_{7Т}$	—0,11	0,28	0,02	0,52	0,65	0,47	0,48	0,62	0,36	0,05	0,17	—0,14
$K_{8Т}$	0,27	0,49	0,10	0,68	0,75	0,57	0,49	0,64	0,38	0,14	0,30	0
$K_{10Т}$	0,12	0,29	0,04	0,57	0,66	0,45	0,38	0,53	0,23	—0,13	0,31	0
$K_{13Т}$	—0,26	—0,41	—0,11	0,10	0,30	0,01	0,20	0,40	0,03	0	0,17	—0,19

Продолжение табл. 8

Факторы K_{jT}	Характеристики глазодвигательного поведения			Показатели эффективности						Комплексный критерий		
	$r_{MK_{jT}}$			$r_{tK_{jT}}$			$r_{\xi K_{jT}}$			$r_{NK_{jT}}$		
	$\bar{r}$	$r_в$	$r_и$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_н$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_н$	$\bar{r}$	$r_в$	$r_и$
K_{1T}	0,22	0,41	0,08	0,41	0,52	0,28	—0,4	—0,55	—0,26	—0,36	—0,51	—0,24
K_{2T}	—0,36	—0,51	—0,27	—0,15	—0,31	—0,04	—0,27	—0,46	—0,08	0,30	0,45	0,16
$K_{3T}^{п}$	0,32	0,06	0,2	0,39	0,08	0,26	0,42	0,07	0,07	0,16	0,29	0,05
$K_{3T}^{к}$	0,16	0,31	0,08	0,33	0,48	0,18	—0,44	—0,55	—0,31	—0,32	—0,48	—0,14
K_{4T}	—0,15	—0,32	—0,04	—0,39	—0,54	—0,28	0,18	0,33	0,09	0,37	0,52	0,28
K_{5T}	0,68	0,76	0,55	0,80	0,88	0,69	0,74	0,81	0,68	0,88	0,95	0,77
K_{6T}	0,70	0,77	0,59	0,77	0,82	0,70	0,76	0,82	0,71	0,94	0,96	0,89
K_{7T}	0,43	0,55	0,28	0,66	0,76	0,45	0,48	0,61	0,32	0,65	0,72	0,53
K'_{7T}	0,40	0,51	0,25	0,59	0,73	0,41	0,42	0,55	0,26	0,43	0,55	0,29
K_{8T}	0,38	0,52	0,23	0,65	0,72	0,53	0,53	0,66	0,35	0,60	0,72	0,50
K_{10T}	0,39	0,48	0,31	0,63	0,72	0,50	0,52	0,64	0,33	0,58	0,75	0,39
K_{13T}	0,20	0,40	0,08	0,30	0,47	0,12	0,26	0,42	0,07	0,16	0,33	0,05

Из приведенных в табл. 8 значений коэффициентов корреляции K_{jT} с t — $r_{tK_{jT}}$ и с ξ — $r_{\xi K_{jT}}$ видно, что основные показатели эффективности деятельности t и ξ, а также число фаз M и критерий сложности N при таком предположении определяются прежде всего числом операций в алгоритме поиска и реализации решения (K_{5T} и K_{6T}), а также оперативным объемом восприятия (K_{7T}), числом оперативных единиц восприятия (K_{10T}) и числом элементов, выстраиваемых в очередь (K_{8T}). Отсюда следует, что при постоянном алгоритме поиска и реализации решения задач повышение эффективности решения может быть достигнуто за счет уменьшения числа оперативных единиц восприятия путем их укрупнения и предварительной обработки информации, при которой операции выстраивания элементов в очередь будут максимально упрощены.

В некоторых случаях должны быть предприняты попытки уменьшить K_{5T}, когда оператору может быть сразу отображено решение, например, в виде СОИ с динамической структурой, описанного в гл. 4, п. 13, позволяющего оператору оценивать ситуацию в целом и быстро реагировать на ее изменения. Можно также строить особые командно-информационные СОИ, непосредственно отображающие алгоритм реализации решения (при этом $K_5 \to 0$).

Для снижения K_6 наиболее эффективно, по-видимому, уменьшение числа органов управления, улучшение их конструкции и расположения.

Результаты исследований позволяют судить о статистических связях между различными показателями деятельности (см. табл. 9).

Большие значения r_{Nt}, $r_{N\xi}$, r_{NM} естественны, поскольку $N = t\xi M$. Высокая коррелированность между собой t, ξ и M говорит об избыточности критерия сложности N, но и дополнительно подтверждает его достоверность и представительность. В то же время для экономии в подобных исследованиях можно с успехом пользоваться частными критериями оценки эффективности деятельности оператора с мнемосхемами, например, t, ξ или M. Подтвердилось предположение о том, что число смены фаз ЭОГ в ходе решения свидетельствует о субъективной сложности задачи для данного испытуемого. В целом по всем испытуемым это проявилось в виде тесной статистической связи M с N, а также с t и в меньшей мере с ξ.

Некоторая дополнительная косвенная информация получена о роли различных фаз ЭОГ в процессе решения.

Неопределенность фазы «начального осмотра ситуации» (T) сказалась на некоррелированности T с другими показателями и факторами сложности, причем и с K_{jT}, и K_{jP} (см. табл. 7, 8, 9); $r_{TK_{jP}}$ имеет в большинстве случаев отрицательные значения. Необходимо признать, что фаза T выделена безосновательно.

Таблица 9

Корреляционная матрица парных связей показателей решения (с доверительными интервалами для $p_{дов} = 0,9$)

Показатели		t	ξ	T	P	Q	Z	M	N
Время решения	t	1	0,73 0,81—0,68	0,05 0,15—0,09	0,87 0,95—0,77	0,62 0,72—0,51	0,66 0,73—0,54	0,75 0,82—0,69	0,86 0,91—0,75
Число ошибок	ξ		1	0,07 0,17—0,07	0,65 0,72—0,53	0,61 0,69—0,47	0,59 0,70—0,41	0,66 0,73—0,55	0,84 0,91—0,73
Длительность фазы ознакомления	T			1	0,02 0,14—0,12	0,11 0,28—0,02	0,2 0,37—0,03	0,12 0,31—0,06	0,17 0,29—0,05
Длительность фазы $t_{фм}$ $a_б$	P				1	0,43 0,55—0,29	0,65 0,72— (—0,57)	0,82 0,88—0,70	0,89 0,95—0,77
Длительность фазы $t_{фм}$ $a_м$	Q					1	0,1 0,27— (—0,06)	0,56 0,68—0,40	0,46 0,59—0,30
Длительность фазы $t_{фб}$	Z						1	0,8 0,87—0,64	0,78 0,82—0,70
Число фаз	M							1	0,85 0,89—0,72
Комплексный критерий	N								1

Большие значения r_{Pt}, $r_{P\xi}$, r_{PN} , r_{PM} и др. свидетельствуют о важном значении фазы P (с параметрами $t_{фм}$, $a_б$) в решении задач, об увеличении длительности этой фазы с возрастанием сложности задач, причем теоретически (по K_{jT}) P больше связана с характеристиками алгоритмической структуры задач (см. табл. 8), однако реально (по K_{jP}) на P оказывают существенное влияние также количество визуальных элементов ситуации и число функциональных связей между ними (см. табл. 7).

В целом статистические связи фазы Q ($t_{фм}$, $a_м$) сходны с P, однако относительно невысокая корреляция между ними ($r_{PQ} = 0{,}43$) говорит об их самостоятельной роли.

Особый интерес представляют статистические связи фазы Z ($t_{фб}$). Наличие длительных фиксаций свидетельствует о сложности задачи ($r_{ZN} = 0{,}78$, $r_{ZM} = 0{,}8$, $r_{Zt} = 0{,}66$: см. табл. 9). В то же время отрицательное значение $r_{Z\xi} = -0{,}59$ свидетельствует о том, что наличие фазы $t_{фб}$ и ее большая длительность являются существенной предпосылкой правильного решения задачи. Фазы $t_{фм}a_б$ и $t_{фб}$ в большой степени взаимно исключают друг друга по длительности ($r_{ZP} = -0{,}65$), но $r_{P\xi} = 0{,}65$ при равном отражении сложности ($r_{PN} = 0{,}89$, $r_{ZN} = 0{,}78$). Отсюда следует, что в процессе решения может быть более длительной либо фаза Z, либо P, но в первом случае вероятность правильного решения задачи будет значительно выше.

Более полное и цельное представление о характере статистической зависимости показателей деятельности от факторов K_{jT} и K_{jP}, позволяющее проанализировать влияние структуры реального отображения условий задачи на ход решения по сравнению с теоретическими минимальными значениями факторов сложности задач, можно получить с помощью уравнений множественной регрессии. На основе анализа этих уравнений, а также данных о парных статистических связях может быть решен ряд важных с точки зрения синтеза СОИ задач, в том числе выявлены факторы, наиболее сильно влияющие на величины различных показателей (при реальных значениях факторов — K_{jP}), произведена ориентировочная оценка максимального изменения показателей при замене реального СОИ идеальным (когда все $K_{jP} = K_{jT}$), приближенно определены возможные изменения показателей при частичном усовершенствовании СОИ (когда отдельные $K_{jP} \rightarrow K_{jT}$), произведен выбор групп связанных факторов K_{jP} (см. табл. 6), на которые возможно одновременное воздействие с целью снижения их значений. Наконец, в ходе анализа множественных статистических связей можно более точно определить, какие значения факторов сложности задач больше влияют на показатели деятельности: теоретические (отражающие собственную объективную структуру оперативных задач) или реальные (учитывающие, кроме этого, особенности конкретного способа представления информации).

Расчеты велись на ЭВМ Минск-22 по стандартным программам[1], а также по специальной программе, предназначенной для учета максимального числа факторов:

$$t = 2{,}7 + 0{,}53K_{1P} + 1{,}32K_{3P}^{n} + 0{,}76K_{3P}^{k} + 0{,}62K_{4P} + 0{,}72K_{5P} + \\ + 0{,}97K_{6P} + 0{,}32K'_{7P} + 0{,}29K_{8P} + 0{,}9K_{10P} + 0{,}4K_{14P} + 3{,}55K_{15P}; \quad (28)$$

коэффициент множественной корреляции в этом случае $R(K_{jP}) = 0{,}824$.

По стандартной программе получено также более простое выражение для линейного множественно регрессионного уравнения:

$$t = 43{,}51 + 0{,}82K_{1P} + 0{,}86K_{5P} + 1{,}58K_{6P};$$
$$R(K_{jP}) = 0{,}67.$$

Аналогично рассчитанное уравнение множественной регрессии t на K_{jT} выглядит так:

$$t = 31{,}8 + 2{,}6K_{5T} + 1{,}4K_{6T} + 0{,}4K_{7T} + 0{,}2K_{8T} + 0{,}75K_{15T}.$$

При этом $R(K_{jT}) = 0{,}764$.

Следует обратить внимание на то, что выбранные факторы сложности задач ($K_1 \div K_{15}$) в целом даже при использовании простейших линейных регрессионных уравнений достаточно точно статистически определяют время решения задач, причем реальные значения факторов более тесно связаны с t, чем теоретические.

Если в уравнение (28) вместо K_{jP} подставить значения факторов K_{jT} и сравнить количественно уравнение (28) и вновь полученное уравнение, то можно вычислить ориентировочную величину максимального выигрыша во времени решения задач при оптимизации структуры СОИ. Рассчитаем условные средние значения t, подставив в уравнение (28) средние значения K_{jP} и K_{jT}:

$$t(K_{jP}) = 80{,}8 \text{ с}; \quad t(K_{jT}) = 50{,}63 \text{ с}.$$

Таким образом, теоретически резерв сокращения времени решения использовавшихся экспериментальных задач за счет полной рационализации СОИ ориентировочно составляет 30,13 с, или 37%.

Проведение совместного анализа уравнения (28) и табл. 7 и 8, а также сопоставление значений K_{jT} и K_{jP} позволяет определять возможные способы приближения $t(K_{jP})$ к $t(K_{jT})$.

Уравнение множественной регрессии ξ на K_{jP}

$$\xi = 0{,}41 + 0{,}01K_{1P} + 0{,}02K_{2P} + 0{,}01K_{3P}^{k} + 0{,}017K_{5P} + \\ + 0{,}025K_{6P} + 0{,}01K'_{7P} + 0{,}03K_{10P} + 0{,}01K_{13P} + 0{,}025K_{14P}.$$

[1] Математическое обеспечение ЭВМ «Минск-2 (22)» в режиме Т. Вып. 2. Минск. Изд. Института математики АН БССР, 1969, с. 73—84.

Повторив условную процедуру подстановки значений $K_{j\text{Т}}$ в уравнение множественной регрессии вместо $K_{j\text{Р}}$, как это мы сделали для t, получим

$\xi(K_{j\text{Т}}) = 1{,}4$, в то время как $\xi(K_{j\text{Р}}) = 1{,}77$.

Таким образом, теоретически число ошибок при решении экспериментальных задач могло бы быть уменьшено на 21% ($\Delta\xi = 0{,}37$) при более рациональном отображении условий задач на СОИ, так чтобы $K_{j\text{Р}} \rightarrow K_{j\text{Т}}$. Такой расчет, основанный на предположении линейности уравнений множественной регрессии t и ξ на $K_{j\text{Р}}$ и $K_{j\text{Т}}$, бесспорно, должен рассматриваться как ориентировочный, позволяющий лишь качественно оценить направление и порядок возможного изменения показателей деятельности оператора. Количественное уточнение этих изменений может быть произведено только экспериментально.

Анализ процессов решения оперативных задач по мнемосхеме показал, что однозначное представление этого процесса в виде последовательной цепочки операций (алгоритма) невозможно вследствие многообразия видов операций, их чередования и комбинирования в действиях разных испытуемых и на разных этапах их обучения.

В то же время анализ выявил ряд факторов, которые в большинстве случаев влияют на процесс решения (зачастую на самых различных его этапах для разных испытуемых, опытов и задач), обусловливая разный уровень сложности решения задач. В качестве основного метода изучения влияния факторов сложности задач на показатели их решения использован анализ статистических связей между факторами сложности и показателями, а также между отдельными факторами и между различными показателями. Влияние индивидуальных различий и различий в уровне подготовки устранялось путем усреднения данных постоянной группы испытуемых.

По электроокулограммам изучалась фазовая структура глазодвигательного поведения испытуемых при решении задач по мнемосхеме. В целом подтвердилась гипотеза В. Ф. Рубахина об этапном характере процессов принятия решения. Состав фаз, как и мыслительных операций, в разных предъявлениях колеблется в широких пределах, однако статистические связи между отдельными фазами и показателями, различия вероятностей последовательной смены отдельных фаз, статистические связи между длительностью фаз и различными факторами сложности задач вполне достоверны.

Длительность фаз с параметрами ЭОГ $t_{\text{фм}}$, $a_{\text{м}}$ и $t_{\text{фм}}$, $a_{\text{б}}$ зависит от реальных значений таких факторов, как число визуальных элементов ситуации и функциональных связей между ними и характеристики алгоритмической структуры задачи.

Длительность фаз с параметром ЭОГ $t_{\text{фб}}$ статистически прямо связана со временем решения задач и отрицательно с числом допускаемых при решении ошибок. Эта фаза, видимо,

играет ответственную роль — на нее в основном приходится отбраковка интерферирующих (более вероятных по прошлому опыту, но неверных) решений и формирование адекватного решения задачи на основе известного общего приема (класса) решений.

Фаза $t_{фб}$ существенно отличается от фазы «отстройки» (Ф) как по показателям активности α-ритма ЭЭГ, так и по показателям сложности задач, в процесс решения которых включались эти фазы. Фаза отстройки характеризует наиболее сложные, проблемные задачи. Среднее число ошибок при решении задач с фазой отстройки вдвое больше, а время в 1,6 больше, чем для задач, решавшихся без отстройки.

При постоянном СОИ относительная сложность различных экспериментальных оперативных задач для определенной группы испытуемых (или операторов) может быть на практике оценена по средним значениям таких показателей, как время решения задач и число допущенных ошибок. Более полным и статистически избыточным из-за коррелированности составных показателей критерием сложности задач может служить произведение средних значений времени решения, числа ошибок и числа фаз.

Сложность оперативных задач обусловливается рядом факторов. Каждый из факторов, учитывавшихся в данном исследовании, может быть охарактеризован количественно. Причем эти характеристики количественно различаются при определении их значений теоретически — на основе анализа собственной структуры объекта и возникающих на нем оперативных ситуаций, и при определении их реальных значений на основе психологического анализа процессов решения задач испытуемыми (и операторами) с использованием конкретного СОИ.

Элементы объекта (параметры, органы управления, технологические агрегаты и узлы) включены в множество отношений, взаимосвязей с другими элементами, часть из которых релевантны, а остальные иррелевантны возникшей задаче. Для решения каждой конкретной задачи оператору, строго говоря, необходим не весь объект, а некоторая его часть («подобъект», подсистема). Если же все отношения — связи в объекте отображены одинаково, то оператор с большой вероятностью включает как бы по индукции в общий анализ состояния объекта исследование не только релевантных, но и иррелевантных отношений. Вследствие этого анализ усложняется (исследуется более сложный подобъект — с бóльшим числом взаимосвязей, чем требуется для решения задачи) и, следовательно, удлиняется по времени процесс решения и повышается вероятность ошибок. Таким образом, сложность решения задачи определяется как собственной структурой задачи, зависящей от объективной структуры объекта и происходящих в нем процессов, так и способом отображения оператору исходных условий задачи. Анализ результатов экспериментов показал, что прибли-

жение реальных значений факторов сложности задач $K_{j\text{Р}}$ к их теоретическим значениям $K_{j\text{Т}}$ может служить средством повышения эффективности решения оперативных задач, в том числе уменьшения среднего времени и числа ошибок. Отношение $a_j = \frac{K_{j\text{Р}}}{K_{j\text{Т}}}$ назовем условно коэффициентом индукции данного j-го фактора. Если по всем факторам $a_j = 1$, то для данной задачи СОИ является идеальным каналом передачи информации.

Полученные данные о значении коэффициентов корреляции средней длительности фиксаций глаз $R = t_\text{ф}$ и показателей эффективности ($\bar{r}_{R-t} = 0{,}056$; $\bar{r}_{R-\xi} = -0{,}043$; $\bar{r}_{R-\xi t} = 0{,}009$) свидетельствуют о том, что для выбранного типа оперативных задач этот параметр ЭОГ не является критерием сложности.

Реальные значения многих факторов сложности задач $K_{j\text{Р}}$ имеют между собой тесные положительные статистические связи, таким образом, уменьшение значений одного или нескольких факторов путем соответствующей рационализации структуры мнемосхемы должно обеспечить снижение реальных значений сразу большинства факторов.

Далее мы перейдем к исследованию влияния структуры мнемосхемы на реальные значения основных факторов и в целом на сложность решения оперативных задач.

Глава

3

Исследование влияния состава и структуры мнемосхем на сложность решения оперативных задач

8

О методах определения состава графической информационной модели

Построение любой информационной модели начинается с отбора событий, информация о которых должна представляться оператору для выполнения им всех возложенных на него функций в различных режимах работы управляемого объекта.

Среди проектировщиков основного технологического оборудования и средств автоматизации весьма распространено ошибочное мнение, в соответствии с которым оператору необходимо вынести информацию о всех принципиально возможных событиях, зачастую без учета их относительной частоты, важности и необходимости для оперативного управления. Наряду с удорожанием информационной системы такой подход приводит к перегрузке оператора излишней информацией и, в конечном счете, падению эффективности его работы. Психологическая структура такого явления исследована Б. Ф. Ломовым, О. А. Конопкиным и др. Ряд подобных случаев на реальных и лабораторных примерах проанализирован нами ранее [21]. В связи с этим требование лаконичности мы считаем одним из исходных при построении СОИ.

При создании СОИ сложной системы должны учитываться выработанные в системотехнике принципы построения сложных систем, в том числе «принцип явлений с малой вероятностью», который в формулировке Р. Е. Макола предусматривает, чтобы характеристики системы не изменялись с целью ее приспособления к работе не только в типичных, реальных условиях, но и в ситуациях, вероятность возникновения которых очень мала.

Более строгий вариант этого принципа состоит в учете не только вероятностей событий, но и среднего ущерба в случае, если оператор не сможет эффективно ликвидировать нарушение режима работы системы из-за отсутствия на СОИ необходимой информации [4].

Вопрос отбора выносимой на СОИ информации решается совершенно по-разному для детерминированных и недетерминированных (стохастических) систем. Рассмотрим эти варианты на примере крупных энергетических объектов.

В качестве примера отбора информации в детерминированной системе приведем метод анализа достаточности информации, представляемой оператору на мнемосхеме энергетического блока для контроля за действиями управляющей вычислительной машины (УВМ) [21].

В период освоения управляющих вычислительных машин, а он обычно характеризуется относительно низкой надежностью их эксплуатации, наряду с применением специальных контрольных программ, закладываемых в УВМ, может выявиться потребность в постоянном наблюдении за их работой со стороны оператора. Такой поэлементный контроль за действиями автоматических устройств со стороны оператора может применяться только как крайняя и притом временная мера. Для этого на СОИ должны отражаться все основные переключения, производимые УВМ на объекте, и, следовательно, в процессе создания СОИ необходимо убедиться в достаточности для этого представляемой информации. Один из методов анализа описан нами в [21].

Такой анализ является предварительным и формальным, поскольку он не учитывает особенностей восприятия и переработки информации оператором. Однако он позволяет ориентировочно оценить качество информационной системы как «полуфабриката», пригодного для дальнейшей проработки СОИ.

Рассмотрим вопрос отбора информации в случае недетерминированных функций оператора. В качестве примера возьмем деятельность диспетчера объединенной энергосистемы при ликвидации аварий.

Критерием оценки оперативного управления объединенной энергосистемой (ОЭС) в аварийных режимах следует считать минимум ущерба от ограничения подачи электроэнергии потребителям. Этот частный критерий согласуется с общим критерием эффективности работы ОЭС, который определяется как минимум затрат на производство и распределение энергии.

Предлагаемый метод определения объема информации в ОЭС основан на общих принципах информационного анализа систем централизованного контроля, разработанных Ф. Е. Темниковым [113] и В. И. Николаевым [89]. Сбор статистических данных по конкретной ОЭС и их статистическая обработка на ЭВМ по данному методу проведены под руководством начальника

службы средств диспетчерского телемеханизированного управления ОЭС Урала М. А. Артибилова. Основные результаты работы изложены в нашей совместной статье [4].

Состояние энергообъединения в каждый момент времени характеризуется состоянием множества n параметров M_j ($j = 1, 2, \ldots, n$) — координат процесса управления. Этими параметрами являются нагрузки электростанций и линий электропередач, напряжение и частота в различных точках энергосистемы. Одной из интегральных характеристик распределения вероятностей координат является энтропия H; при условии независимости всех координат

$$H = \sum_{1}^{n} H_j,$$

где H_j — энтропия единичной координаты (параметра) или комплекса связанных между собой координат.

Очевидно, что в процессе управления диспетчер посредством СОИ при аварии Q_i может получить информацию только о части координат, например, о k из n параметров:

$$\alpha_i = \sum_{1}^{k} \alpha_j,$$

где α_j — информация об аварийной ситуации Q_i, содержащаяся в значении параметра M_j.

Для оценки эффективности управления в конкретной аварийной ситуации может быть использован информационный критерий

$$C_{Q_i} = \frac{\sum_{1}^{k} \alpha_j}{\sum_{1}^{n} H_j}.$$

Количественная информационная мера сигнала (или комплекса сигналов) относительно возникшей аварийной ситуации, очевидно, может быть определена как количество информации, содержащееся в сигнале M_j относительно ситуации Q_i:

$$\alpha_{Q_i M_j} = \log \frac{p\,(Q_i/M_j)}{p\,(Q_i)},$$

где $p\,(Q_i/M_j)$ — вероятность ситуации Q_i при наличии сигнала M_j;
$p\,(Q_i)$ — априорная вероятность возникновения Q_i.

При отсутствии сигнала M_j количество информации относительно Q_i измеряется

$$\alpha_{Q_i, \overline{M}_j} = \log \frac{p\,(\overline{M}_j/Q_i)}{p\,(\overline{M}_j)} = \log \frac{1 - p\,(M_j/Q_i)}{1 - p\,(M_j)}.$$

Для комплекса сигналов Z_k ($M_1, \ldots, M_k$) информационная мера

$$\alpha_{Q_i, Z_k} = \log \frac{p\,(Q_i/Z_k)}{p\,(Q_i)} = \alpha_{Z_k, Q_i} = \log \frac{p\,(Z_k/Q_i)}{p\,(Z_k)}.$$

В работах М. Л. Быховского доказано, что

$$\alpha_{Q_i Z_k} = \alpha_{Q_i, M_1} + \alpha_{Q_i, M_2/M_1} + \alpha_{Q_i, M_3/M_1, M_2} + \cdots + \alpha_{Q_i, M_k/M_1, \ldots, M_{k-1}}, \qquad (29)$$

где $\alpha_{Q_i, M_1, \ldots, M_{j-1}}$ — количество информации, содержащееся в сигнале M_j относительно Q_i, если есть сигналы $M_1, \ldots, M_{j-1}$, это информациониая мера M_j;

$$\alpha_{Q_i, M_1, \ldots, M_{j-1}} = \log \frac{p(Q_i/M_1, \ldots, M_j)}{p(Q_i/M_1, \ldots, M_{j-1})} = \log \left[\frac{p(M_j/Q_i)}{p(M_j)} \right]_{M_1, \ldots, M_{j-1}}.$$

Если сигналы независимы друг от друга, то привносимая любым сигиалом информация равиа его информациоиной мере

$$\alpha_{Q_i, M_j/M_1, \ldots, M_{j-1}} = \alpha_{Q_i, M_j}.$$

В этом случае

$$\alpha_{Q_i, Z_k} = \alpha_{Q_i, M_1} + \alpha_{Q_i, M_2} + \cdots + \alpha_{Q_i, M_k}, \quad (30)$$

а при зависимых сигиалах остается справедливой формула (29).

Значения $p(Q_i)$ и частных информациоиных мер параметров (сигналов) α_{Q_i, M_j} сводятся в матрицу по типу табл. 10.

На основе сведенных в матрицу данных могут быть вычислены информационные меры отдельных сигналов, а по ним — информационные меры наборов сигналов $Q_1 - Q_n$. Контроль правильности оценки диспетчером ситуации по наборам параметров следует производить по наибольшей вероятности $p(Q_k)$.

Если

$$p_1(Q_k) \geqslant P^*,$$

где P^* — некоторое итоговое значение, то диспетчер с достаточной вероятностью, не ниже заданной, верно соотносит набор сигналов с реальной ситуацией, возникшей в системе, т. е. успешно диагностирует ситуацию по ее модели на СОИ.

Существо процесса диагностирования состоит в том, что при возникновении сигнала M_k диспетчер просматривает значения некоторого числа параметров $M_1, M_2, \ldots, M_j, \ldots, M_n$, так чтобы с достаточной вероятностью (не ниже P^*) отнести событие к определенному классу. Преимущество оператора перед машиной по отношению к задачам диагностирования — в способности дать общую качественную оценку ситуации. Недостаток — ограниченность емкости памяти на числовые значения параметров, медленное выполнение операций сравнения. Наиболее целесообразно рассчитывать на ЭВМ гистограммы распределения вероятностей событий по данной комбинации ограниченного числа зафиксированных признаков и либо отображать их оператору, например, в виде контуров с яркостями подсветки, пропорциональными вероятностям, для контроля, отбраковки и принятия окончательного решения, либо учитывать эти распределения при определении приоритетов и автоматическом регулировании потоков сигналов.

При разделении сигналов необходимо добавить к условию

$$p(Q_k) \geqslant P^*$$

9*

Таблица 10

Вероятиостиые и информациоииые характеристики ситуаций и параметров

Аварийные ситуации	Вероятиость ситуации	Ожидаемый ущерб	Частные информационные меры параметров					
Q_1	$p(Q_1)$	Y_1	α_{Q_i}, M_1	α_{Q_1}, M_2	α_{Q_1}, M_3	. . .	α_{Q_1}, M_j	α_{Q_1}, M_k
Q_2	$p(Q_2)$	Y_2	α_{Q_2}, M_1	α_{Q_2}, M_2	α_{Q_2}, M_3	. . .	α_{Q_2}, M_j	α_{Q_2}, M_k
Q_3	$p(Q_3)$	Y_3	α_{Q_3}, M_1	α_{Q_3}, M_2	α_{Q_3}, M_3	. . .	α_{Q_3}, M_j	α_{Q_3}, M_k
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮ ⋮ ⋮	⋮	⋮
Q_i	$p(Q_i)$	Y_i	α_{Q_i}, M_1	α_{Q_i}, M_2	α_{Q_i}, M_3	. . .	α_{Q_i}, M_j	α_{Q_i}, M_k
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮ ⋮ ⋮	⋮	⋮
Q_m	$p(Q_m)$	Y_m	α_{Q_m}, M_1	α_{Q_m}, M_2	α_{Q_i}, M_3	. . .	α_{Q_m}, M_j	α_{Q_m}, M_k

еще условие

$p(Q_k) \geqslant p(Q_r) + A$

либо

$p_1(Q_i) \geqslant Bp_r(Q_i)$,

где A и B — заданные числа, причем $B > 1$; r — номер ситуации, имеющей вероятность, бо́льшую, чем все ситуации, кроме Q_k.

$p(Q_k)$ зависит от информационной меры всех параметров $M_1, \ldots, M_n$.

Если

$$\sum_i M_i a_{ij} + (1 - M_i)\bar{\alpha}_{ij} > L_j,$$

то диспетчеру представляется достаточно информации для установления события Q_k; если же

$$\sum_i M_i \alpha_{ij} + (1 - M_i)\bar{\alpha}_{ij} < L_j,$$

то определенного суждения с заданной доверительной вероятностью диспетчер вынести не сможет, при этом повышается вероятность ошибочного решения оперативной задачи вследствие интерференционного влияния априорно более вероятных ситуаций, в характеристику которых также входит данный набор сигналов.

Наиболее важным практическим вопросом является выбор нижнего предела $p(Q_k)_{\min} = P^*$. Очевидно, чем больше P^*, тем больше сигналов должно быть выведено на СОИ, однако тогда с уменьшением влияния фактора интерференции возрастает влияние таких факторов, как число связей между элементами K_{1P}, оперативный объем отображения K_{7P} и др., что, в свою очередь, приведет, как было выявлено в гл. 2, к увеличению времени решения оперативных задач и числа ошибок. Таким образом, при выборе величины $P_{\text{опт}}$, являющейся функцией числа выводимых на СОИ параметров, необходимо учитывать целый ряд факторов, обусловливающих сложность решения оперативных задач K_{jP}. Возможен другой путь — учет суммарных потерь (ущерба) системы при различных наборах отображаемых параметров.

Информационная мера любого набора k параметров относительно ситуации Q_i рассчитывается по формуле (30).

Рассматривая для энергосистемы m конкретных аварийных ситуаций и учитывая, что каждая из них имеет вероятность $p(Q_i)$ и ожидаемый ущерб (в относительных единицах) y_i, можно составить $k \times m$ матрицу (см. табл. 10), достаточную для расчета полного информационного критерия по всем m ситуациям:

$$C = \sum_{i=1}^{m} p(Q_i) Y_i \sum_{j=1}^{k} \alpha_{Q_i, M_j}. \qquad (31)$$

Это выражение представляет математическую модель энергосистемы, которая позволяет аналитически определить объем информации, необходимый для управления ОЭС в аварийных режимах, исходя из требования минимизации общего ущерба системы при возникновении и ликвидации всех m аварий.

Задачу определения этого объема можно сформулировать следующим образом: найти состав параметров M_j, максимизирующий C при следующих ограничениях:

$$\sum_{1}^{n} a_{ij} \geqslant R; \quad n \leqslant S.$$

Здесь R — минимальное число информационных элементов для обеспечения надежного диагностирования и ликвидации диспетчером конкретной аварии; S — ограничение по одновременному восприятию и обработке диспетчером потока входящих сигналов. Ограничение и метод определения значения $n_{\text{опт}}$ обоснованы в гл. 5.

Отметим, что выражение (31) представляет запись задачи целочисленного линейного программирования, что позволяет решать его для конкретных случаев с использованием ЭВМ.

Пример расчета различных составляющих, входящих в уравнение (31), для фрагмента конкретной объединенной энергосистемы при возникновении аварии рассмотрен в [4]. Определен состав параметров M_n, информация о которых должна отображаться диспетчеру при рассматриваемой аварии.

Следующим этапом является расчет коэффициентов $\alpha_{Q_i M_j}$, определяющих информационную меру, или «вес» каждого параметра, причем необходимо, чтобы эти оценки были объективными. Попытки определить коэффициенты методом экспертных оценок не дали желаемых результатов, поскольку оказалось, что в значительной степени оценки определялись субъективным подходом и личным опытом каждого опрашиваемого диспетчера. Результаты предварительного опроса диспетчерского персонала ОЭС показали, что одним и тем же параметрам дается оценка от двух до десяти баллов (при десятибалльной системе). В эту оценку входит необходимость учета каждого параметра при ликвидации аварий, ущерб, к которому может привести отсутствие на СОИ этого параметра, необходимость его контроля для управления системой в нормальных режимах. Значительное влияние на оценку оказывают уровень подготовки диспетчера, опыт его работы, а также такие информационные факторы, как доля информации, которую он получает по телефону, наличие и способы использования телеинформации и т. д.

При определении важности параметра условимся считать объективной оценкой важности вероятность его отклонения от нормального или заранее заданного состояния. Таким образом, для телесигнализируемого двухпозиционного объекта (выключателя, линии, блока и т. д.) это будет вероятность его аварийного отключения, а для телеизмеряемого параметра — вероятность его отклонения от заданного графиком значения. Введение такой оценки позволяет: во-первых, использовать объективные статистические данные по аварийному срабаты-

ванию выключателей, имеющиеся в энергосистеме, а из анализа суточных графиков системы или лент регистрирующих приборов получить данные по отклонениям различных параметров от нормы; во-вторых, такая оценка удобна при использовании информационной меры для определения объема информации.

Исследования, проведенные для ОЭС, дали следующие значения вероятностей отключения высоковольтных линий с различными уровнями напряжения: 500 кВ — 0,144; 220 кВ — 0,370; 110 кВ — 0,486; вероятность контроля параметров: для мощностей линий 500 кВ — 0,9; 220 кВ — 0,7; для мощностей гидростанций — 0,560, тепловых электростанций — 0,428, для напряжений 500 кВ — 0,297 и т. д. Вероятность отключения линий определялась как отношение числа отключений линий к общему числу отключений оборудования, находящегося в оперативном управлении и ведении диспетчера. Вероятность контроля различных параметров определялась как отношение числа с отклонениями параметра к общему числу точек графика, равному 120. Для получения представительных статистик делалось допущение: для включателей линий одного напряжения и сходных параметров измерения (мощности линий одного напряжения) определялись средние значения вероятностей, которые затем распространялись на все аналогичные параметры системы.

Из приведенных значений вероятностей видно, что телесигнализация положения включателя на высоковольтной линии с напряжением 500 кВ несет в себе меньше информации — 0,4 двоичных единиц информации, чем выключателя с напряжением 110 кВ — 0,5 двоичных единиц информации. Следовательно, при ликвидации конкретной аварии для диспетчера важнее положение выключателя 110 кВ, а не 500 кВ. Это, однако, не значит, что при определении объема информации для всей энергосистемы будут выбраны параметры сети 110 кВ, так как при рассмотрении достаточно крупного числа аварийных ситуаций большее участие примут параметры сети, находящейся в оперативном управлении и ведении диспетчера; кроме того, удельный вес каждой аварии будет определяться коэффициентом ущерба Y_i и вероятностью аварии $p(Q_i)$, которые значительно усилят вес сети 500 кВ. Для исследуемой ОЭС расчетные относительные коэффициенты ущерба составили: для линии 500 кВ — 1,0, для 220 кВ — 0,25 и для 110 кВ — 0,1.

При использовании изложенной методики был проведен анализ 140 типичных для ОЭС аварийных ситуаций, имевших место в течение ряда лет. Они включают в себя аварии, связанные с перегрузкой основных транзитных линий, потерей устойчивости, понижением напряжения и частоты, аварийным снижением мощности на станциях, отключением транзитных линий (в нормальных и ремонтных режимах) и должны охватывать все оборудование, находящееся в оперативном управлении и ведении диспетчера ОЭС.

Для определения результирующего объема информации необходимо просуммировать все столбцы матрицы $n \times m$ с учетом коэффициентов ущерба и вероятностей аварий. В результате мы получим ряд параметров с различными весовыми коэффициентами, определяющими их важность. Распределив параметры по степени убывания важности, можно отобрать наиболее существенные из них и определить общий объем отображаемой на СОИ информации, введя ограничения R и S. Величина R определяется в процессе анализа структуры диагноза различных аварийных ситуаций.

Изложенный аналитический метод был использован на практике для определения оптимального объема информации, необходимой диспетчеру для управления конкретной объединенной энергосистемой в аварийных режимах.

В ходе исследований было установлено, что наиболее важной для диспетчера в аварийных режимах является следующая информация: телесигнализация линейных выключателей сети высшего напряжения, телеизмерение значений мощности электроэнергии, передаваемой по основным транзитным линиям, суммарной мощности регулирующих станций, уровни напряжения и частоты в опорных точках системы. Наименее информативными оказались телеизмерения мощности электроэнергии, передаваемой по межсистемным линиям электропередачи различного напряжения, суммарные мощности энергосистем, входящих в ОЭС. Эти величины было рекомендовано исключить из состава непрерывно контролируемых и индивидуально сигнализируемых параметров.

Сокращая число отображаемых на СОИ параметров, мы сталкиваемся с тем, что набор признаков, вынесенных на СОИ, может оказаться недостаточным для различения некоторых ситуаций в системе. Допустим, по признаку средних вероятных системных потерь нами выделена как важная ситуация S_1 и решено вынести на СОИ совокупность отображающих ее параметров m_1. Вместе с тем при этой комбинации информационных признаков m_1 в системе может иметь место и ситуация S_2, для идентификации которой необходимо было бы вынести на СОИ дополнительные элементы, составляющие совокупность признаков m_2. Вопрос о том, в каких случаях можно пренебречь возможностью ошибочного диагноза ситуации S_2 при отображении на СОИ объема элементов m_1 и когда необходимо дополнить число элементов СОИ для отображения S_2 через адекватную совокупность признаков m_2, может быть дополнительно рассмотрен с применением математических теоретико-игровых методов. Эти методы наряду с адаптивным байесовым подходом пригодны для исследования и синтеза СОИ новых объектов с неизвестными вероятностными характеристиками.

Для того чтобы расширить задачу, которую мы ставим, будем считать, что ошибки в диагностировании ситуаций S_1 и S_2 обусловливаются вообще наличием шумов в информацион-

ной системе, которые могут носить описанный выше характер — недостаток элементов на СОИ либо обусловливаться неполадками в информационной системе, искажающими действительный набор m_i признаков — информационных сигналов, ошибками оператора и т. п.

Предположим, что оператор должен выносить суждение о возникновении на объекте ситуации S_1 или S_2. Ситуации возникают с вероятностями p и $(1-p)$ соответственно. С учетом наличия помех в информационной системе возникновению каждой из этих ситуаций может соответствовать включение комбинаций m_1 или m_2 элементов СОИ.

Допустим, что помехи в информационной системе с вероятностью $p_0 \leqslant \frac{1}{2}$ взаимно трансформируют комбинации m_1 и m_2.

Пусть выигрыш оператора при правильном диагностировании ситуации на объекте в каждом случае одинаков и составляет α, а его проигрыш при неправильном диагностировании — β. Допустим, $\alpha > \beta \geqslant 0$. Оценкой информационной системы может служить средний выигрыш оператора (цена игры — минимакс среднего выигрыша).

Перепишем возможные стратегии оператора:

$Q_1 (m_1;\ m_2/m_1) = [S_1;\ S_2]$; $Q_5 (m_1;\ m_2/m_2) = [S_1;\ S_2]$;
$Q_2 (m_1;\ m_2/m_1) = [S_2;\ S_2]$; $Q_6 (m_1;\ m_2/m_2) = [S_2;\ S_2]$;
$Q_3 (m_1;\ m_2/m_1) = [S_2;\ S_1]$; $Q_7 (m_1;\ m_2/m_2) = [S_2;\ S_1]$;
$Q_4 (m_1;\ m_2/m_1) = [S_1;\ S_1]$; $Q_8 (m_1;\ m_2/m_2) = [S_1;\ S_1]$.

Перечисленные выше стратегии интерпретируются следующим образом: например, $Q_7 (m_1;\ m_2/m_2) = [S_2;\ S_1]$ означает, что если возникшей на объекте ситуации S_1 соответствует на СОИ комбинация сигналов m_1, то оператор опознает ее как S_2, а при восприятии комбинации m_2 делает заключение о наличии ситуации S_1.

Для оператора возможно 8 перечисленных выше стратегий. Маскирующая ситуация S_2 имеет две стратегии. Если сократить дублирующие и ограничиться доминирующими стратегиями, то останутся стратегии Q_1, Q_2, Q_4, Q_7 и достаточно выписать платежную матрицу игры 4×2:

$$A = \begin{array}{c|ll|} & m_1 & m_2 \\ Q_1 & a(1-p_0) + bp_0; & a[p(1-p_0) + (1-p)p_0] + \\ & & + b[pp_0 + (1-p)(1-p_0)]; \\ Q_2 & a(1-p) + bp; & a(1-p) + bp; \\ Q_4 & ap + b(1-p); & ap + b(1-p); \\ Q_7 & a[p(1-p_0) + p_0(1-p)] + & a(1-p_0) + bp. \\ & + b[pp_0 + (1-p)(1-p_0)]; & \end{array}$$

Рассмотрим несколько характеристик диапазонов изменения соотношения основных параметров p, $1-p$ и p_0 [88],

от которых зависят значения элементов матриц, соответствующих оптимальным стратегиям оператора (Q_i^*), совпадающим с координатами стратегической седловой точки среднего выигрыша.

1. Рассмотрим диапазон $0 \leqslant p \leqslant \frac{1}{3-2p_0}$. При этом условии Q_2 — оптимальная стратегия, так как соответствующая ей строка доминирует над Q_4, а также над Q_2 и Q_7.

Таким образом, при заданном условии

$Q_2^*(m_1,\ m_2/m_1) = [S_2,\ S_2]$.

Аналогично дублирующая стратегия Q_6 также оптимальна:

$Q_6^*(m_1,\ m_2/m_2) = [S_2,\ S_2]$.

В этом случае цена игры $\theta = pb + (1-p)\,a$.

2. Пусть $\frac{1}{3-2p_0} \leqslant p \leqslant \frac{1}{1+2p_0}$.

При этом случае оптимальна смешанная стратегия, полученная как линейная комбинация элементов стратегий Q_1 и Q_7 с коэффициентом $^1/_2$:

$$\overline{X}^* = \left| \frac{1}{2},\ 0,\ 0,\ 0,\ 0,\ 0,\ \frac{1}{2},\ 0 \right|,$$

а цена игры $\theta = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2}\,p\,(1-2p_0)$.

3. Третий диапазон $\frac{1}{1+2p_0} \leqslant p \leqslant 1$.

Здесь оптимальная группа стратегий

$Q_4^*(m_1,\ m_2/m_1) = [S_1,\ S_1]$;

$Q_8^*(m_1,\ m_2/m_2) = [S_1,\ S_1]$.

Цена игры

$\theta = pa + (1-p)\,b$.

На основе полученных данных можно сделать некоторые выводы относительно случаев, в которых при проектировании информационной системы и СОИ можно пренебречь возможностью ошибочного диагностирования как весьма маловероятного [1] и допустить отображение m_1 (S_1), когда в действительности имеет место m_2 (S_2).

В диапазоне $0 \leqslant p \leqslant \frac{1}{3-2p_0}$ допустимо такое отображение состояния объекта, когда и m_1, и m_2 приводят к диагнозу S_2. Важно, что качество работы оператора при этом не зависит от помех в информационной системе (ослабляющих различие

[1] Для вынесения окончательного решения по этому поводу следует принимать во внимание также соотношение a и b, которое зависит, в частности, от возможности и скорости обнаружения допущенной ошибки в диагностировании при выполнении дальнейших операций.

между m_1 и m_2). При $p_0 \to 0$ этот диапазон сужается, а минимальное значение игры возрастает и определяется расчетами неймановской антагонистической игры двух лиц, используемой нами для сравнительного исследования вариантов структур СОИ (п. 25).

Следовательно, возрастание p_0 расширяет диапазон вынесения оператором диагноза S_2, причем минимальное значение цены игры

$$\min \theta = \frac{1}{3 - 2p_0} [b + 2a(1 - p_0)].$$

При условиях $\frac{1}{1 + 2p_0} \leqslant p \leqslant 1$ и $p > 0$ оказывается оправданным диагноз S_1 при любом отображенном комплексе сигналов.

Практически наиболее общим является случай 2, однако с точки зрения аналитических методов исследования стратегии отображения он является и наиболее неопределенным.

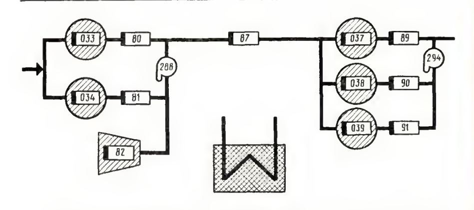
9 Последовательное предъявление и зрительное выделение контуров на мнемосхеме как средства повышения эффективности решения задач

В экспериментах, описанных в п. 5, выявлена отрицательная корреляция между фактором, характеризующим избыток информации на мнемосхеме, и показателями деятельности испытуемых — временем решения $r_{K_{4P}t}$ и числом ошибок $r_{K_{4P}\xi}$. Эти данные противоречат результатам исследований деятельности операторов со многими другими типами средств отображения [37, 59, 76], а также общим положениям теории информации о вредном влиянии иррелевантной информации на процессы переработки и передачи информации.

Некоторые факты, выявленные в п. 5, давали основание предполагать, что на эти результаты существенное влияние оказывало изменение сложности задач, происходившее одновременно с изменением коэффициента избыточности информации K_{4P} и имевшее обратную тенденцию: чем выше K_{4P}, т. е. чем меньше элементов входит в задачу, тем она менее сложна.

Необходимо так поставить экспериментальное исследование, чтобы сложность задач оставалась постоянной при изменении соотношений общей и релевантной информации.

Для этой цели мы разработали особый тип мнемосхем — сменные мнемосхемы. Количество элементов и структура обыч-



ной мнемосхемы остаются неизменными во всех режимах работы объекта и в любой момент отображают информационную модель объекта полностью. На самом деле оператор в каждом случае работает лишь с частью объекта, скажем, его пусковой схемой, схемой регулирования параметров в стабильном режиме и т. п., которые в отдельных случаях могут быть функционально разделены и отображены в разные периоды работы объекта по отдельности или в различных комбинациях (в том числе и в виде полной мнемосхемы). Сменные мнемосхемы основаны на принципе отображения актуальных контуров, соответствующих конкретным оперативным задачам.

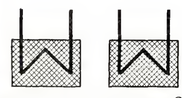
Опыт показывает, что практически у каждого объекта часть его схемы участвует во всех режимах и переключениях. Эта часть схемы может играть роль постоянного, базового элемента сменной мнемосхемы (или другого типа СОИ), общего для всех вариантов, облегчая оператору переход от одного варианта отображения к другому и синтетическое восприятие всех их как единого управляемого объекта.

Конструктивных принципов осуществления сменных СОИ может быть предложено много. Это, например, электролюминесцентные и электрохимические панели, телевизоры, диа- и кинопроекторы. Проекционные СОИ находят все более широкое распространение, поскольку они позволяют получать качественное изображение любых размеров [99, 116]. Действие сменного СОИ, основанное на проекционном принципе, описано нами в гл. 8, п. 22.

Попутно заметим, что применение сменных СОИ помогает не только сосредоточить оператора на актуальном контуре объекта, но и добиться динамичности СОИ за счет изменения его структуры. Это, в свою очередь, обусловливает ориентировочную реакцию, являясь дополнительным средством повышения готовности оператора. Следует, однако, иметь в виду, что этот и любой другой вид динамичности СОИ может служить постояннодействующим фактором повышения готовности



6 *Сменная мнемосхема БСП № 1 «Пуск насосов»*



оператора, если изменения СОИ требуют активных ответных действий оператора, иначе динамичность может превратиться в индифферентный раздражитель, оказывающий отрицательное действие на человека.

В экспериментах использовалась сменная мнемосхема блока сетевых подогревателей ТЭЦ. Именно по этому объекту ранее решались испытуемыми оперативные задачи, но в п. 5 описаны опыты с постоянной, полной мнемосхемой БСП, представленной на рис. 2.

Как показал анализ действий испытуемых, при решении некоторых задач отображение такой полной мнемосхемы не обязательно. Например, при пуске подъемных и сетевых насосов мнемосхема может быть упрощена и представлена, как на рис. 6. В этом случае оператору необходимы органы управления для заливки и пуска насосов, а также информация о давлении по водному тракту.

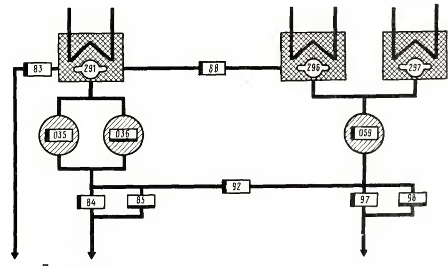
Сменная схема регулирования уровня конденсата представлена на рис. 7.

Любая из сменных мнемосхем представляет собой часть общей мнемосхемы. Наличие в качестве базовых элементов изображений сетевых подогревателей на каждой схеме облегчает ассоциации между ними и их восприятие как деталей СОИ единого технологического объекта. Все элементы сменного СОИ располагаются на определенных постоянных местах. На каждой сменной мнемосхеме дано наименование типа оперативных задач, для решения которых предназначена схема.

Методика экспериментов аналогична той, которая применялась в описанном в гл. 2, п. 5 исследовании влияния факторов, обусловливающих сложность решения оперативных задач. Из приведенного там перечня здесь использовались задачи, условия которых могут быть отображены одной или несколькими последовательно предъявляемыми сменными мнемосхемами. Некоторые из них были специально разбиты на этапы для облегчения их отображения. Например, пуск блока сетевых подогревателей здесь был разделен на четыре задачи: 1 — включить насосы; 2 — включить подогреватели; 3 — отрегулировать уровень конденсата; 4 — отрегулировать температуру сетевой воды. Далее решались следующие задачи: 5 — повысить выходные параметры БСП: P_{294}, P_{302} и t_{301} (испытуемому предъявлялась сумма сменных мнемосхем); 6 — максимально быстро сбросить температуру t_{301} (см. рис. 2); 7 — понизить уровни конденсата H_{296} и H_{297}.

Задачи условно разбиты на две группы: первая группа (1—4) — задачи по пуску и вторая группа (5—7) — задачи по регулированию в нормальной эксплуатации.

Исследования проведены совместно с А. А. Митькиным. Наряду с фиксацией времени решения и числа ошибок реги-



7 *Сменная мнемосхема БСП № 4 «Регулирование уровня конденсата»*

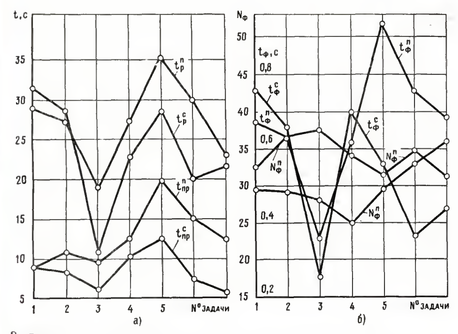
стрировалась векторэлектроокулограмма, на основании которой анализировались маршруты обзора мнемосхемы, подсчитывались число фиксаций глаз и их средняя длительность.

В опытах участвовало 8 испытуемых, с каждым из них проведено по 4 экспериментальных сеанса. Задачи решались по полной и сменным мнемосхемам в случайном порядке.

На рис. 8 представлены средние результаты по всем испытуемым. Из полученных данных видно, что показатели решения задач при наличии значительного избытка информации (по полным мнемосхемам) хуже, чем показатели решения тех же задач по сменным мнемосхемам: по общему времени решения на 9,9 с, в том числе по времени до первого речевого ответа (основной период оценки ситуации и принятия решения) — на 5 с. По полной мнемосхеме испытуемые в среднем делали на 2,1 ошибки больше, чем по сменным.

Статистически достоверные различия получены также по показателям глазодвигательного поведения испытуемых: при полной мнемосхеме средняя длительность фиксаций $t_ф = 0{,}58$ с, а число точек фиксаций $N_ф = 39$; при сменных мнемосхемах эти значения соответственно равны 0,51 с и 31.

Детальный анализ электроокулограмм выявил, что связи между элементами сменных мнемосхем устанавливаются более быстро и уверенно, чем при отображении объекта полной мнемосхемой. В последнем случае нередко наблюдаются многократные переобследования ситуации, описанные О. К. Тихомировым [117], причем на первом этапе обследуются не только связи, относящиеся к задаче, но и другие, в которые включены



8 *Результаты экспериментов*:

а — с полной мнемосхемой ($t^п$; $N^п$); *б* — со сменными ($t^с$, $N^с$) мнемосхемами; $t_{пр}$ — время принятия решения; $t_р$ — общее время решения оперативной задачи; $N_ф$, $t_ф$ — число и длительность фиксаций глаз

основные элементы ситуации, а по этим связям — и элементы, иррелевантные данной задаче. В этом, видимо, состоит основной механизм увеличения реальных значений факторов, обусловливающих сложность оперативных задач. Напротив, применение сменных мнемосхем и изъятие из поля зрения оператора иррелевантных элементов и связей способствует уменьшению значения этих факторов.

Вместе с тем выяснилось, что многие оперативные задачи по сменным мнемосхемам решены быть не могут — необходим контроль общего состояния объекта. Нами был предложен способ зрительного выделения (высвечивания) актуальных контуров на полной мнемосхеме. Такой метод может быть полезен для отображения рекомендательной информации от вычислительных машин-советчиков.

В опытах сравнивались процессы решения оперативных задач по обычной, постоянной мнемосхеме БСП и по мнемосхеме, на которой по ходу решения экспериментатор высвечивал участки контуров, управляя вниманием испытуемого. В опытах участвовало 5 испытуемых, решивших по 22 оперативных задачи по каждому варианту мнемосхемы. Среднее время

Результаты статистической обработки материалов экспериментов с постоянной мнемо
(коэффициенты парной корреляции с доверительными интервалами для $p = 0{,}9$;

Вариант мнемосхемы	Показатели		Психологические факторы						
			K_{1P}	K_{2P}	$K_{3P}^{п}$	$K_{3P}^{к}$	K_{4P}	K_{5P}	K_{6P}
Постоянная мнемосхема	$\overline{K}_{jP}$		46	2,3	16,5	30	1,45	17,5	9
	$r_{tK_{jP}}$	$\overline{r}$	0,281	0,220	0,344	0,244	—0,379	0,447	0,480
		$r_{верх}$	0,497	0,446	0,540	0,466	—0,142	0,627	0,652
		$r_{ниж}$	0,033	0,031	0,098	0	—0,575	0,221	0,261
	b_j		4,48	54,4	1,50	1,51	—31,8	8,77	17,89
	σ_{b_j}		1,99	16,0	1,99	1,84	32,4	4,64	5,79
Мнемосхема с выделением контуров	$\overline{K}_{jP}$		32	2,1	10,5	21	3,9	12	5,8
	$r_{tK_{jP}}$	$\overline{r}$	0,520	0,283	0,460	0,567	—0,620	0,712	0,629
		$r_{верх}$	0,681	0,498	0,637	0,716	—0,437	0,816	0,760
		$r_{ниж}$	0,309	0,035	0,236	0,369	—0,753	0,561	0,449
	b_j		0,69	—13,9	—0,31	0	0,30	10,4	—18,3
	σ_{b_j}		0,22	12,5	0,63		0,39	3,53	9,45

схемой БСП и зрительным выделением ее контуров
b_j — коэффициенты уравнений множественной регрессии)

сложности решения задач							Свободный член уравнения множественной регрессии b_0	Остаточное стандартное отклонение σ_i	Коэффициент множественной корреляции R
K_{7P}	K'_{7P}	K_{8P}	K_{10P}	K_{13P}	K_{14P}	K_{15P}			
30	9,4	7,8	11,7	2,5	9	3,3			
0,485	0,442	0,584	0,902	0,150	0,090	0,424			
0,656	0,623	0,728	0,940	0,386	0,211	0,610			
0,267	0,215	0,391	0,842	0,103	—0,149	0,194			
6,83	4,23	1,52	22,6	7,04	—0,74	0,26	—12,4		0,771
3,02	2,30	0,56	3,04	4,96	2,68	0,34		36,6	
13	4,3	4,9	6,1	2,5	1	3			
0,708	0,644	0,605	0,718	0,144	0	0,252			
0,814	0,770	0,743	0,821	0,381		0,472			
0,556	0,470	0,417	0,570	—0,109		0			
0,35	—0,244	3,61	1,29	—6,11	0	1,57	13,4		0,862
1,31	2,55	6,3	3,17	5,55		2,02		15,29	

решения задач по постоянной мнемосхеме $\bar{t}=97$ с, по мнемосхеме с высвеченными участками $\bar{t}=28{,}3$ с. В первом случае испытуемые допускали в среднем по 1,5 ошибок, во втором ошибки почти полностью исчезли.

Анализ статистических данных (табл. 11) свидетельствует о существенном снижении реальных значений факторов сложности задач при зрительном выделении актуальных участков мнемосхемы, а также об изменении относительной значимости отдельных факторов.

Таким образом, эксперименты показали, что последовательное предъявление и особенно зрительное выделение контуров и участков мнемосхем являются эффективными средствами снижения сложности оперативных задач.

10 Сравнительное исследование процессов решения оперативных задач при разделении интегральной и детальной информации во времени и пространстве

Эксперименты со сменными мнемосхемами, в которых одни и те же задачи решались испытуемыми при разных коэффициентах избыточности информации (K_{4P}), подтвердили, что наличие избыточной информации является одним из существенных факторов, обусловливающих сложность решения оперативных задач. Таким образом, снижение избыточности отображаемой информации является важным средством повышения эффективности деятельности операторов. На практике необходимо выбрать оптимальный способ снижения избыточности информации на СОИ. Принципиально возможно много таких способов, однако почти все они являются частными разновидностями двух основных: в одних осуществляется разделение во времени (этот метод был реализован нами в сменных мнемосхемах), в других — разделение в пространстве.

С целью сравнения эффективности использования двух этих способов при построении мнемосхем сложных систем было предпринято экспериментальное исследование. В качестве примера была выбрана мнемосхема крупной объединенной энергосистемы.

Состояние такого энергообъединения характеризуется огромным числом параметров и может варьировать в широких пределах, причем каждое конкретное состояние, каждая конкретная диспетчерская задача в среднем связана с относительно небольшой долей параметров. На диспетчерских пунктах энергообъединений в качестве СОИ наиболее распространены мне-

мосхемы. Все они построены так, что отображают постоянно подробные схемы всех объектов, входящих в объединение. При этом, как выявил инженерно-психологический анализ деятельности диспетчеров ряда энергообъединений, большинство информационных элементов мнемосхемы в каждом отдельном случае оказываются лишними, затемняющими актуальную информацию на мнемосхеме, тем самым затрудняя диспетчеру выделение и восприятие необходимой информации.

Задача выбора оптимального способа уменьшения доли иррелевантной информации возникла в связи с проектированием комплекса оборудования нового диспетчерского пункта, в том числе мнемосхемы энергосистемы Урала.

Целью настоящего исследования было экспериментальное сравнение процессов решения диспетчерских задач по трем вариантам мнемосхемы ОЭС: 1) основанного на разделении информации во времени; 2) традиционного — с постоянным совмещенным отображением полной схемы: и сетей, и объектов и 3) основанного на разделении интегральной и детальной информации в пространстве.

Принцип действия варианта 1 мнемосхемы, разработанного нашим аспирантом В. А. Вавиловым, аналогичен тому, какой был ранее применен в сменных мнемосхемах БСП. Он состоит в следующем: в нормальном режиме отображается лишь постоянная, основная часть системы — схема соединения объектов — электрические сети; энергетические объекты обозначены при этом лаконичными прямоугольными символами. Те из объектов, которые включены в возникшую задачу, отображаются подробно: на месте символа высвечивается планшет с детальной информацией о схеме объекта и состоянии его агрегатов.

В вариантах 2 и 3 состав мнемосимволов во времени не изменяется, меняется лишь сигнализация состояния агрегатов и линий электропередачи.

В процессе разработки методики экспериментального сравнения вариантов мнемосхемы ОЭС был проведен общий анализ деятельности диспетчеров данной ОЭС и роли мнемосхемы в решении ими различных задач. Описание более общих характеристик деятельности диспетчеров ОЭС, составленное на основе психологического анализа проводившегося нашей лабораторией на диспетчерских пунктах ряда ОЭС, приведено в [21]. В течение 60 дней во время дневной и вечерней смен регистрировались различные виды производственной деятельности, хромометрировались отдельные диспетчерские операции.

Результаты исследования состава деятельности диспетчера сведены в табл. 12. В левой колонке указана доля времени (в %), которую занимает каждый тип деятельности. Полученные данные показали, что по степени важности и доле занимаемого времени главное место занимает основная деятельность, связанная с оперативным управлением ОЭС.

Особое внимание при анализе деятельности диспетчеров было уделено выявлению роли мнемосхемы в их работе.

Специальные наблюдения за деятельностью диспетчера с мнемосхемой на протяжении всей смены показали, что диспетчер очень активно пользуется мнемосхемой не только при оперативном управлении ОЭС, но и других видах

деятельности, например, при восприятии различного рода информации по телефону. Особенно четко это проявляется при поступлении новой информации. В этом случае диспетчер пользуется мнемосхемой для лучшего усвоения информации, ее осмысления и закрепления памяти.

Таблица 12

Результаты исследования состава деятельности диспетчеров ОЭС

Время, %	Характер деятельности	Вид деятельности	Основные действия и операции
20	Побочная деятельность	1. Составление документации 2. Информационно-справочная 3. Производство соединений на коммутаторе	1. Сбор информации о состоянии ОЭС 2. Постоянная корректировка оперативно-психической модели системы
24	Вспомогательная деятельность	1. Выполнение расчетов 2. Поиск и чтение инструкций 3. Консультации 4. Прием сообщений	Прием распорядительной информации
56	Основная деятельность	Оперативное управление ОЭС	1. Контроль и ведение режимов 2. Разрешение заявок 3. Регулирование напряжения 4. Производство переключений 5. Ликвидация аварий

При выдаче осведомительной информации диспетчер также пользуется мнемосхемой. Здесь речь идет уже о процессах актуализации информации, хранящейся в памяти. Приведем высказывание одного из диспетчеров о роли наглядного изображения станции: «Глядя на полную схему станции, я не только вспоминаю, какое оборудование на ней стоит и каково его состояние, но и всю остальную информацию об этой станции: какая автоматика, какие защиты и даже принципы работы защит».

В настоящее время преимущества мнемосхемы как специфического информационного устройства в ОЭС используются недостаточно: мнемосхема плохо приспособлена к задачам, решаемым диспетчером, и обладает большой иррелевантностью. Необходимо найти и исследовать принципы построения мнемосхем, позволяющих снижать избыточность информации. Два таких принципа реализованы в вариантах 1 и 3 мнемосхемы ОЭС Урала. Необходимо было экспериментально сравнить их между собой и с существующим вариантом мнемосхемы, полно и постоянно отображающим информацию об ОЭС.

Оценка мнемосхем производилась путем моделирования в экспериментах деятельности диспетчера по ликвидации аварии. Известно, что, несмотря на большое разнообразие аварийных нарушений в ОЭС, все они могут быть сведены к следующим видам: падение частоты, понижение напряжения, пере-

грузка транзитных линий, исчезновение напряжения на шинах главной схемы электростанций, десинхронизация энергосистем и распад ОЭС на части. В случае серьезных аварий присутствуют сразу несколько указанных нарушений, поэтому в качестве аварийной задачи диспетчерам предъявлялась специально разработанная службой режимов ситуация, связанная с отключением оборудования крупной электростанции, понижением частоты и напряжения, выключением линий и разделом ОЭС. Эта задача предварительно была подробно разобрана и определен оптимальный вариант последовательности действий диспетчера по ликвидации данной аварии и допустимые отклонения от этого алгоритма.

В экспериментах необходимо было организовать деятельность диспетчера в соответствии с реальными условиями ликвидации аварии. Для этого надо было обеспечить не только постепенную выдачу информации об изменении технологических процессов по ходу развития аварии, но и смоделировать реакцию системы в ответ на действия диспетчера.

В связи со спецификой деятельности диспетчеров ОЭС к методике экспериментального сравнения вариантов мнемосхемы ОЭС предъявляется ряд особых требований.

1. Условия аварийной задачи диспетчерского управления ОЭС не могут быть полностью отображены на мнемосхеме, поскольку в процессе диагностирования причин аварии, анализа и состояния системы и выбора способов локализации и ликвидации аварии диспетчер должен иметь доступ к информации с разных уровней иерархической системы управления ОЭС (в [21] показано, что в ОЭС насчитывается около 10 таких уровней), вплоть до выяснения состояния оборудования отдельных блоков. Причем диспетчер как бы переходит в ходе работы с одного уровня на другой, занимаясь то энергообъединением, то отдельной энергосистемой, частично принимая на себя при необходимости функции диспетчера энергосистемы, а иногда даже дежурного инженера станции. Такая гибкость в сборе информации и выдаче команд на практике достигается с помощью телефонной связи с персоналом различных уровней управления. Таким образом, кроме мнемосхемы испытуемый должен иметь возможность получать разнообразную необходимую информацию по телефону. Поскольку в этом случае мнемосхема не будет для испытуемого единственным каналом формирования и корректировки психической модели ОЭС, при анализе данных экспериментов необходимо выделить те действия, которые зависят от мнемосхемы, состава и структуры отображенной на ней информации.

2. Успешное решение реальных аварийных диспетчерских задач возможно только при глубоком знании физико-технических процессов, протекающих в ОЭС, особенностей ее строения, возможностей и ограничений, накладываемых на управление.

Обучить всему этому испытуемых-новичков не представляется возможным, поэтому в экспериментах должны участвовать диспетчеры данной ОЭС. Однако их насчитывается в объединенном диспетчерском управлении всего 10 человек. Необходимо учесть, что разработка каждой аварийной задачи связана с очень большими затратами времени: должны быть просчитаны возможные изменения параметров вследствие различных действий диспетчера в ходе эксперимента, проанализированы все реакции системы и действия персонала в энергосистемах и на объектах. Причем моделирование аварийных ситуаций не освоено на ЭВМ, его должен осуществлять опытнейший диспетчер. В нашем случае это делал в ходе эксперимента заместитель начальника диспетчерской службы. Наконец, надо учесть, что невозможно составить две одинаковые по сложности и зависимости от структуры мнемосхемы задачи. Все это говорит о том, что обычный для психологических экспериментов сбор представительной статистики по количественным показателям — времени решения и ошибкам на большом числе испытуемых в данном случае невозможен. Из-за постоянных переговоров диспетчера по телефону не представилось также на этот раз возможности применить объективную регистрацию глазодвигательного поведения и ЭЭГ.

Основное внимание было уделено содержательному анализу действий диспетчеров, которые очень подробно отражаются в их переговорах по телефону в ходе решения задачи. Причем сопоставление объемов информации, необходимой для решения задачи, полученной непосредственно от мнемосхемы и по телефону, может служить критерием информативности разных вариантов мнемосхемы. Таким образом, подсчет и сравнение числа консультаций, затребованных диспетчером от ведущего, а также сведений по оценке состояния отдельных объектов и по оценке состояния системы в целом в сочетании с содержательным анализом хода решения и опросом диспетчеров после окончания опыта может служить количественным критерием сравнения вариантов мнемосхем.

Существенные сведения об относительных преимуществах и недостатках вариантов мнемосхем и способов снижения избыточности информации на них может дать сравнительный анализ хода (алгоритма) решения задач по разным мнемосхемам, его отличие от оптимального, причины допущенных ошибок, их обусловленность структурой мнемосхем.

Обстановка эксперимента была следующей: испытуемый (диспетчер) находился перед мнемосхемой, на которой было отображено предаварийное состояние системы. Рядом с ним был телефон, по которому диспетчер мог установить связь с любым из объектов, как и в реальных условиях. В другой комнате находился специально готовившийся к экспериментам один из руководителей диспетчерской службы («ведущий») и отвечал по телефону за всех тех лиц, которых вызывал дис-

петчер. Ведущий также от имени персонала управляемых объектов сообщал о тех событиях, которые происходили на этих объектах вследствие развития аварии и воздействий диспетчера. Перед ведущим была схема ОЭС, на которой заранее были отмечены аварийные изменения, и он мысленно моделировал влияние всех команд диспетчера на состояние ОЭС и развитие аварии. Все переговоры между ведущим и диспетчером записывались на магнитофоне.

В экспериментах принимали участие 6 диспетчеров, не знакомых с аварийной задачей; они были распределены на 3 группы по 2 человека на каждую мнемосхему. Затем менялись состав групп и варианты мнемосхемы и эксперименты повторялись со второй задачей.

По окончании эксперимента испытуемые (диспетчеры) давали словесный отчет о своих действиях и высказывали свое мнение о данной мнемосхеме. Затем ведущий производил подробный разбор действий диспетчера.

Результаты экспериментов показали, что среднее время оценки ситуации по исследовавшимся вариантам мнемосхемы имеет следующие значения: вариант 1 — 32,5 с, вариант 2 — 62,5 с, вариант 3 — 80 с. По скорости оценки ситуации вариант 1 мнемосхемы в 1,93 раза превосходит вариант 2 и в 2,47 раза вариант 3. Здесь сказалось то, что в построении мнемосхемы 1 предусмотрено четкое отображение тех станций, на которых выключено оборудование, так что актуальные элементы обнаруживаются без помех. Они представлены планшетами, контрастирующими по цвету с фоном мнемосхемы. На варианте мнемосхемы *3*, так же как и на мнемосхеме, существующей на диспетчерском пункте (вариант 2), диспетчеру необходимо разыскивать те станции, где имеется выключенное оборудование, ориентируясь только на телесигнализацию, что фактически требует поочередного осмотра всех станций.

Результаты также свидетельствуют, что по числу затребованных консультаций вариант 1 мнемосхемы в 2,09 раза лучше, чем вариант 2, и в 1,27 раза лучше, чем вариант 3. По показателю полноты информации о состоянии объектов вариант 1 мнемосхемы в 1,42 раза лучше, чем вариант 2, и в 2,1 раза лучше, чем вариант 3. По легкости оценки общей ситуации — отображению динамики вариант 1 в 1,7 раза превосходит вариант 2 и в 2,46 раза вариант 3.

Следующим шагом при проверке принципов построения мнемосхемы было сравнение конкретных распоряжений диспетчеров по регулированию ОЭС с оптимальным алгоритмом ликвидации аварии.

Те диспетчеры, которые работали с вариантом 2 мнемосхемы, оказались ближе всего к оптимальному алгоритму. Никто из диспетчеров, решавших задачу по вариантам 2 и 3, не смог понять, что произошло выделение одной из энергосистем на самостоятельную работу, вследствие чего их

первые действия не совсем соответствовали сложившейся ситуации.

Отклонения от оптимального варианта могут проявляться в трех видах: неправильный порядок действий, пропуск необходимых действий, выполнение лишних действий.

Результаты общего подсчета отклонений от оптимального алгоритма решения обеих аварийных задач по каждому варианту мнемосхемы приведены в табл. 13.

Таблица 13

Количество отклонений решения от оптимального алгоритма

Варианты мнемосхемы	Число отклонений разных видов		
	Несвоевременные действия	Невыполненные действия	Лишние действия
1	2	4	0
2	9	9	2
3	11	12	2

Данные словесных отчетов выявили, что наибольшее предпочтение испытуемые отдают варианту 1, далее идет вариант 2. Анализ вспомогательных средств деятельности диспетчера показал, что испытуемые, работавшие с вариантом 1 мнемосхемы, производили минимум записей, тогда как испытуемые, работавшие с вариантами 2 и 3, производили фиксацию всей начальной информации.

Результаты проведенных экспериментов показали, что в пределах задач, критериев оценки деятельности и условий, в которых проводились данные экспериментальные исследования, мнемосхема, в которой понижена избыточность информации путем разделения во времени детальной информации, по всем показателям имеет преимущество перед мнемосхемами с постоянным полным отображением детальной и интегральной информации как при их композиционном совмещении (вариант 2), так и при пространственном разделении (вариант 3).

Описанные в этом разделе исследования выявили необходимость придания информационной системе гибкости, позволяющей изменять состав и структуру элементов и связей системы в зависимости от конкретных оперативных задач с целью снижения избыточности отображаемой информации.

Это требование учтено при проектировании диспетчерского пункта объединенной энергосистемы (ОЭС) Урала. Мнемосхему рекомендовано выполнить в виде подробного отображения полной структуры ОЭС с подсветкой актуальных контуров и важнейших межсистемных линий. На рис. 56 показан предварительный вариант компоновки мнемосхемы ОЭС Урала — с разделением информации в пространстве. На пульте управления установлены знакогенерирующие электроннолучевые индика-

торы («дисплеи»), позволяющие диспетчерам вызывать необходимую детальную информацию. Кроме того, предусмотрен избирательный вывод необходимой визуальной информации о схемах коммутации объектов ОЭС на проекционное устройство, встроенное в приборную приставку.

---

11 Влияние структуры мнемосхемы на процесс обучения человека-оператора

Как показали исследования процессов решения оперативных задач, в ходе обучения при многократных повторных предъявлениях однотипных задач происходит свертывание процесса решения. Наблюдается оно и при решении испытуемыми оперативных задач по мнемосхемам. При этом постепенно сводится к нулю корреляция (R) между структурой СОИ и стратегией решения задач испытуемыми. Данное явление заслуживает особого внимания, поскольку время свернутого решения задач может быть меньше времени, определяемого с учетом теоретических, оптимальных значений факторов $K_{j\text{T}}$, обусловливающих сложность обычного, развернутого решения (см. гл. 2). Вместе с тем логично предположить, что скорость свертывания процесса решения в ходе обучения зависит от структуры СОИ, например, компоновки мнемосхемы.

Для проверки этого предположения необходимо провести экспериментальное исследование процессов решения испытуемыми ограниченного набора оперативных задач по различающимся компоновкой вариантам мнемосхемы одного объекта, причем для возможности анализа процессов обучения с каждым испытуемым должно быть проведено достаточное число опытов с повторением задач до достижения свертывания процессов их решения. Очевидно, что изучение влияния компоновки мнемосхемы объекта на скорость свертывания процесса решения непосредственно связано с задачей экспериментального сравнения вариантов компоновки мнемосхем, имеющей самостоятельное практическое значение.

Использование при создании мнемосхемы психологических принципов компоновки СОИ [21] не означает, конечно, что в результате будет найдена ее единственная структура. Напротив, практика показывает, что проектировщиками предлагается обычно несколько вариантов, выбор наилучшего из которых без применения объективных методов сравнения весьма затруднен. Необходимость в применении таких методов возникала перед нами каждый раз, когда создавалась мнемосхема сложного объекта или системы и в не меньшей степени — при поиске общих принципов компоновки мнемосхем.

В ходе опытов испытуемые решали задачи, описанные в гл. 2, но по разным вариантам мнемосхемы. Уже в предварительной серии экспериментов наблюдался процесс изменения показателей решения задач — времени и числа ошибок и постепенное свертывание процесса решения. После некоторого периода обучения испытуемые рефлекторно реагировали на экспериментальные ситуации, которые вначале требовали больших затрат времени на подробный анализ и формирование решения, причем показатели деятельности с опорой на разные варианты мнемосхемы после некоторого числа экспериментов практически сравнивались. На этом уровне обученности испытуемых по результатам решения ими оперативных задач выбрать оптимальный вариант уже не представляется возможным (впрочем из-за отсутствия различий в показателях само понятие оптимальности становится неопределенным).

С другой стороны, как показало наблюдение за работой операторов реальных объектов, в том числе ТЭЦ-21, мнемосхема которой частично была воспроизведена в лаборатории, процесс решения ими оперативных задач почти всегда носит развернутый характер. На сложном объекте, имеющем огромное число возможных комбинаций сигналов, операторы практически никогда не достигают уровня обученности, при котором они реагировали бы на сигналы автоматически. Как показали наблюдения, время решения определенных оперативных задач в среднем стабилизируется на некотором относительно постоянном уровне. Опытный оператор, даже сразу «увидевший» решение, как правило, не реализует его сразу, а подвергает достаточно тщательной логической проверке, прогнозирует поведение системы, если будет реализовано данное решение. Таким образом, выяснилось, что экспериментальная ситуация позволяет изучать динамику свертывания процесса решения оперативных задач, но в то же время требуется ее существенное уточнение с точки зрения возможностей сравнения вариантов мнемосхем и выбора оптимального из них для практического использования. Основные замеры контрольных показателей в опытах должны для этого выполняться на том уровне обученности испытуемых, который наиболее соответствует уровню обученности операторов соответствующих объектов в отношении строго определенных функций — решения данного типа оперативных задач. Таким образом, изучая весь процесс обучения испытуемых до полного свертывания решения, мы должны выделить в нем особую зону. Сделаем несколько замечаний по поводу вероятностных методов исследования динамики обучения операторов. Проблема обучения сформулирована Р. Бушем, в частности, как задача нахождения цепи стимулов (событий) в зависимости от реакции человека-оператора, с тем чтобы кратчайшим путем добиться наперед заданной степени адекватности реакций (по скорости и точности) на любые изменения, которые могут произойти в системе. В этом смысле обучение можно рас-

сматривать как процесс приближения к наперед заданной вероятности правильных реакций человека на совокупность отображаемых на СОИ событий.

Математическая обработка результатов большого числа проведенных нами экспериментов с мнемосхемами и другими типами СОИ показывает, что процесс обучения испытуемых до определенного уровня во многих случаях описывается как цепь Маркова. Это значит, что если правильную реакцию испытуемого-оператора обозначить через A, а неправильную через B, то для последовательности начальных обучающих опытов будут характерны некоторые постоянные вероятности переходов: $p(A|A)$, $p(A|B)$, $p(B|A)$, $p(B|B)$. Разумеется, что реакции A и B несовместимы, так что, например, начальные вероятности $p_0(A) + p_0(B) = 1$.

Для полного определения цепи Маркова достаточно знать $p_0(A)$, $p(A|A)$ и $p(B/A)$. Необходимо установить вероятность $p_n(A)$ наступления события A при испытании с номером n, не зная всех предыдущих событий. Те последовательности, которые начинаются с события A, имеют вероятность

$$p_1(A) = p_0(A)\,p(A|A) + p_0(B)\,p(A|B).$$

Очевидно, задача сводится к нахождению вероятности части всего множества цепей Маркова, состоящих из последователей, имеющих событие A при испытании с номером n:

$$p_{n+1}(A) = p_n(A)\,p(A\mid A) + p_n(B)\,p(A\mid B) = p(A\mid B) + [p(A\mid A) - p(A\mid B)]\,p_n(A).$$

Если обозначить $p(A\mid B)$ через a, а $p(A\mid A) - p(A\mid B)$ через α, то получим линейное разностное уравнение

$$p_{n+1}(A) = a + \alpha p_n(A).$$

Решение уравнения имеет вид

$$p_n(A) = \alpha^n p_0(A) + (1 - \alpha^n)\,p_\infty(A), \qquad (32)$$

где

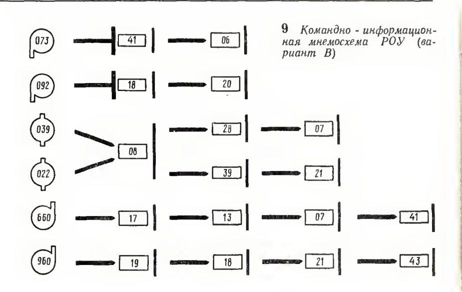
$$p_\infty(A) = \frac{a}{1-\alpha} = \frac{p(A\mid B)}{p(B\mid A) + p(A\mid B)}.$$

Формула (32) позволяет рассчитать число экспериментов, необходимое для достижения требуемой вероятности правильных реакций испытуемого. Она и будет в дальнейшем использована при планировании экспериментов по сравнению вариантов мнемосхем.

Нетрудно заметить, что при $-1 < \alpha < 1$ и $n \to \infty$ $p_n(A)$ приближается к асимптоте $p_\infty(A)$. Как правило, начальное распределение вероятностей реакций оператора отличается от асимптотического, и необходима серия обучающих опытов для приближения к асимптоте, соответствующей вероятности правильного решения при свернутом его процессе. Причем минимальное число опытов в такой серии непосредственно зависит от построения СОИ.

В качестве примера экспериментов, связанных со сравнением вариантов мнемосхем, рассмотрим решение задач по мнемосхеме относительно простого агрегата ТЭЦ — редукционно-охладительной установки собственного расхода (РОУ), компоновка которой выполнена в двух вариантах — *А* и *Б*.

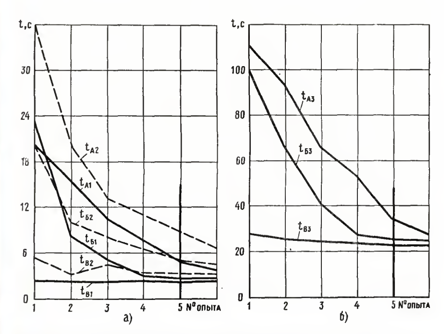
Задачи, которые решались испытуемыми в эксперименте, были выбраны по аналогии с задачами, реально возникающими перед оператором на объекте при управлении РОУ. Экспериментальный материал включал три группы задач, различающихся степенью сложности. Первая группа состояла из четырех



9 *Командно - информационная мнемосхема РОУ (вариант В)*

наиболее простых задач, для решения которых испытуемому достаточно сделать одно переключение в ответ на сигнал отклонения параметра. Вторая группа задач (их также было четыре) требовала для решения последовательной цепочки действий в ответ на один сигнал. Третья группа включала наиболее сложные задачи, состоящие из последовательности сигналов и соответствующей последовательности ответных действий.

Анализ решения испытуемыми задач в предварительной серии показал, что свертывание процесса решения при обучении происходит прежде всего за счет сокращения этапов анализа состояния объекта и формирования решения. Испытуемый при повторениях задачи постепенно перестает анализировать физико-технологические процессы, обусловившие то или иное нарушение режима, и процесс решения вырождается в реакцию выбора на определенные комбинации сигналов, опознаваемые испытуемым как целостные образы. Принципиально такой процесс «замыкания» между исходной ситуацией и требуемым конечным результатом решения оперативной задачи, максимально сокращающий время решения, может быть воспроизведен, минуя период специального обучения, путем специального построения СОИ. Поскольку число экспериментальных задач в данном случае ограничено, можно на СОИ отобразить в явной форме алгоритм реализации решения каждой задачи, тем самым искусственно свернув процесс решения. Такие СОИ мы предложили называть командно-информационными [21], именно такое СОИ в виде командно-информационной мнемосхемы РОУ (вариант *В*, см. рис. 9) применено в данном исследовании. Левый столбец элементов (*073*, *092* и т. д.) —

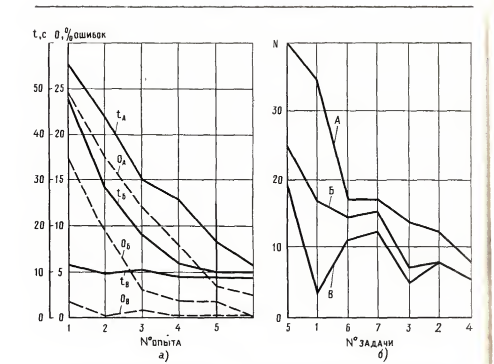


10 *Результаты экспериментального сравнения вариантов А, Б и В мнемосхемы РОУ по времени решения задач отдельных групп*:
а — первой (t_{A1}, $t_{Б1}$, $t_{В1}$) и второй (t_{A2}, $t_{Б2}$, $t_{В2}$) групп; *б* — третьей группы (t_{A3}, $t_{Б3}$, $t_{В3}$)

мнемознаки параметров. Справа — мнемознаки органов управления и операций по их переключению в зависимости от характера нарушения режима.

Каждый испытуемый, работая 6 экспериментальных дней по одному из вариантов СОИ, каждый день решал по 11 задач в случайной последовательности. В экспериментах приняли участие 21 человек. При работе по мнемосхемам *А* и *Б* испытуемые предварительно инструктировались относительно технологического характера объекта, изображенного на мнемосхеме; им объясняли назначение каждого органа управления и сигнального элемента. Кроме того, с каждым испытуемым проводились тренировки до полного усвоения принципов управления объектом. При работе с командно-информационной мнемосхемой (вариант *В*) предварительный период был сведен к минимуму: объяснялось лишь значение знаков на панели и предлагалось освоиться с расположением тумблеров на пульте.

В протоколах экспериментов фиксировались время решения испытуемым каждой задачи и количество ошибок. Состав испытуемых был разнообразный: сотрудники ВНИИТЭ, студенты, сотрудники ВДНХ — люди, не имеющие опыта операторской работы (и, следовательно, привычки к какому бы то ни было



11 *Сравнение вариантов А, Б и В мнемосхемы РОУ по средним показателям решения задач:*

а — по времени (t_i) и числу ошибок (O_i); *б* — по общему числу фиксаций глаз (N) в опыте № 5

типу мнемосхемы). Возраст — от 20 до 35 лет. Испытуемые были разбиты на три одинаковые по численности группы, каждая из которых начинала эксперименты с определенного варианта мнемосхем (*А*, *Б* или *В*) и затем переходила на остальные.

На рис. 10 и 11 приведены графики среднего времени решения задач по экспериментальным дням (опытам) для вариантов *А*, *Б* и *В* по первым двум группам задач (рис. 10, *а*) и по третьей группе (рис. 10, *б*); на рис. 11 приведены данные по времени решения и проценту ошибочных действий, усредненные по всем задачам и испытуемым.

Из графиков видно, что выигрыш во времени решения при работе по схемам *Б* и *В* в сравнении со схемой *А* тем больше, чем сложнее группа решаемых задач. Однако по мере обучения вследствие свертывания процесса решения эта разница неуклонно уменьшается и в 6-й экспериментальный день уже становится незначительной и статистически малодостоверной (доверительный интервал для 6-го дня 0,75), в то время как для предыдущих, как правило, не ниже 0,9—0,95. Следова-

тельно, при сравнении вариантов СОИ в расчет должны приниматься результаты некоторых промежуточных экспериментов, когда уровень обученности испытуемых соответствует показателям деятельности операторов на реальном объекте при решении таких же задач.

Выявившийся парадокс, состоящий в том, что испытуемые за 6 дней (опытов), как это произошло в наших исследованиях, выучиваются работать быстрее и точнее, чем оператор, имеющий многолетний опыт работы, объясняется тем, что экспериментальный объект — РОУ составляет всего лишь 1% от общего объема оборудования, управляемого оператором блока ТЭЦ-21 Мосэнерго. Следовательно, набор возможных вариантов задач в опытах составляет ничтожную часть тех, которые возникают перед оператором блока.

Методика выбора уровня обученности испытуемых, который отражается посредством значений изменяющихся экспериментальных показателей, при сравнении вариантов СОИ состоит в следующем. Поскольку вариант A мнемосхемы РОУ в точности повторяет мнемосхему РОУ на реальном операторском пункте блока ТЭЦ, необходимо найти момент в экспериментах, когда показатели работы испытуемых (среднее время решения задач и вероятность ошибок) равны аналогичным показателям работы операторов ТЭЦ-21. При планировании основной серии экспериментов был рассчитан номер опыта, в котором в среднем достигается такое равенство. Для этого использовалась формула (32). Соответствующие обозначения: A — правильное действие испытуемого в ответ на сигнал; B — ошибочное действие; n — число экспериментальных дней.

В экспериментах можно достигнуть весьма высокой точности действий испытуемых: $p_\infty (A) = 0{,}95$. Из наблюдений за деятельностью реальных операторов получено $p_n (A) = 0{,}92$. Для начала обучения испытуемого (первых опытов после инструктажа) характерно $p_0 (A) = 0{,}55$. Из результатов предварительных экспериментов получено: $p (A | A) = 0{,}98$; $p (A | B) = 0{,}39$. Отсюда $\alpha = 0{,}59$. Подставив эти значения в (32), получим

$$p_n (A) = 0{,}59^n \cdot 0{,}55 + (1 - 0{,}59^n)\, 0{,}95.$$

Методом подбора получаем $n = 5$.

Результаты экспериментов по числу ошибок: $p_n (B) = 1 - p_n (A)$, представленные в табл. 14 и 15, подтвердили этот вывод: средний процент ошибок, допущенных испытуемыми при работе по варианту A мнемосхемы РОУ на 5-й день (7,2%), наиболее близок к среднему проценту ошибок, допускаемых оператором на объекте (6,7%).

Дополнительным подтверждением правильности выбора показателей 5-го экспериментального дня для сравнения вариантов компоновки мнемосхемы служит близость значения времени решения задач испытуемыми по варианту A в этом опыте и операторами по аналогичной мнемосхеме на ТЭЦ.

Таблица 14

Число ошибок, допущенных испытуемыми при решении задач по вариантам СОИ *А*, *Б* и *В*

Вариант СОИ	Экспериментальный день						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	Всего
А	40	29	20	14	6	4	113
Б	29	16	5	2	2	0	54
В	2	1	0	0	0	0	3

Таблица 15

Процент ошибок от общего числа задач, решаемых в экспериментах

Вариант СОИ	Экспериментальный день						Оператор
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	
А	48	35	23,8	16,7	7,2	4,8	6,7
Б	34,5	19	6	2,4	2,4	0	—
В	2,4	0	1,2	0	0	0	—

Проведенные эксперименты позволили установить, что примененный метод исследования мнемосхем позволяет проводить сравнение различных вариантов, опираясь на объективные критерии оценки их эффективности.

В рассматривавшемся конкретном случае, когда решения всех оперативных задач известны и полностью формализуются, мнемосхема может быть заменена командно-информационным средством отображения. Это обеспечивает повышение точности и скорости работы оператора за счет полного свертывания процесса решения.

Различия в построении мнемосхем (варианты *А* и *Б*) обусловливают различия в скорости обучения и достижения уровня обученности операторов, при котором процесс решения задач имеет свернутый характер: по варианту *А* такой уровень достигнут на 6-й экспериментальный день, по варианту *Б* — на 4-й.

Необходимо более глубоко в сравнительном плане проанализировать структуру деятельности и динамику обучения при решении задач по этим двум вариантам (см. табл. 16).

Таблица 16

Среднее время решения задач испытуемыми, с

Вариант СОИ	Экспериментальный день						Оператор
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	
А	57	44	31	25	17	11	20
Б	48	29	18	11	10	10	—
В	11	10	10	9,5	9,5	9,5	—

Такая задача была поставлена в экспериментальной работе, проведенной совместно с А. А. Митькиным [24].

Для исследования специфики информационного поиска при работе с различными вариантами мнемосхемы была использована векторэлектроокулографическая запись движений глаз.

Векторэлектроокулографический анализ позволяет на основе объективных показателей изучить некоторые особенности механизма зрительной деятельности оператора, определить важные пространственно-временные характеристики зрительного восприятия, например количество точек фиксации глаз на отдельных элементах СОИ.

Регистрация движений глаз позволяет судить о порядке осмотра зон изображения и его элементов, требующих тонкого визуального различения. Это относится и к работе с мнемосхемой, в процессе которой оператор переводит взгляд с одного элемента (символа параметра или органа управления) на другой, для того чтобы различить их и прочитать номера. Одновременно велась подробная протокольная запись хода эксперимента, которая в дальнейшем облегчала расшифровку окулограмм.

При обработке данных наряду с качественным анализом маршрутов движения глаз на разных этапах работы при различных вариантах мнемосхемы был проведен количественный анализ по двум параметрам: числу точек фиксации (или шагов) на каждом анализируемом отрезке эксперимента и соотношению воспринятой испытуемым релевантной и иррелевантной информации.

При анализе результатов исследований ставились следующие основные цели: а) выявить общую стратегию и тактику построения маршрутов обзора мнемосхемы в условиях решения испытуемым-оператором конкретных задач по управлению объектом; б) проследить динамику изменений зрительной деятельности оператора по мере совершенствования навыков работы с мнемосхемой; в) установить корреляцию между моторикой глаз оператора и последовательностью выполняемых им логичных операций; г) определить, чем обусловлены в одних случаях быстрые и точные действия оператора, в других — замедленные и ошибочные; д) провести сравнительный анализ вариантов *А* и *Б* мнемосхемы РОУ по всем перечисленным выше пунктам, выявив сравнительные достоинства этих вариантов и их слабые места; е) сопоставив результаты окулографического анализа с результатами проведенной ранее экспериментальной проверки тех же вариантов мнемосхемы, уточнить возможности окулографии в качестве методики для объективной оценки достоинств и недостатков компоновочных решений мнемосхем.

Эти эксперименты подробно описаны в работе [24]. На основе результатов этой серии экспериментальных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

В процессе совершенствования навыка работы с мнемосхемой происходит упрощение маршрутов движения глаз от запутанных, хаотических, избыточных к четким, строго упорядоченным, целенаправленным и коротким. Динамика обучения

зависит от структуры мнемосхемы. На стадии выработки навыка информационный поиск в условиях работы с мнемосхемой детерминирован структурой мнемосхемы.

Окулографический анализ дает возможность проследить динамику процессов решения в ходе обучения, выявить логику процесса информационного поиска, осуществляемого с помощью мнемосхемы, установить причины наиболее характерных ошибок и задержек в работе.

Исходя из результатов объективного экспериментального сравнения вариантов *А*, *Б* и *В* мнемосхемы, необходимо отметить бесспорные преимущества варианта *В* перед вариантами *А* и *Б*. Несмотря на очевидные ограничения, накладываемые на применение командно-информационных СОИ, они могут быть практически использованы в некоторых случаях, там, где допустимо и целесообразно свертывание процесса решения оперативных задач.

Существенным недостатком многих современных средств отображения информации, предназначенных для контроля и наладки оборудования, является их перегруженность разноплановой информацией, в том числе несущественными с точки зрения конкретных функций этих операторов технологическими деталями и подробностями. Кроме того, способ подачи и структура отображения информации часто не согласованы с логикой и структурой действий оператора. Например, операторы, осуществляющие техническое обслуживание систем, как правило, вынуждены в настоящее время пользоваться в своей работе формулярами и печатными инструкциями, в которых перечисляются длинные последовательности контрольных операций.

Было проведено экспериментальное сравнение эффективности действий операторов при использовании традиционных печатных инструкций и новых графических средств типа командно-информационных мнемосхем (КИМ).

Построение этих мнемосхем основано на идее условно-абстрактных средств отображения информации, изложенной в гл. 1. Практический смысл заключается в том, чтобы освободить оператора от всякой избыточной информации, в том числе от содержательной информации о чрезвычайно сложном физико-технологическом характере контролируемых процессов, поскольку оператор по уровню своей квалификации не может, а по задачам — и не должен в ней разбираться. С другой стороны, существенная оперативная информация должна при этом отображаться в лаконичной и наглядной форме. Причем принцип командно-информационных средств отображения предполагает воспроизведение на панели не только сигналов о состоянии объекта, но и алгоритмов реализации решений, процесс принятия которых свернут уже на стадии разработки СОИ. Алгоритмы могут быть представлены, например, в виде цепочек контрольных опера-

ций с указанием их очередности, нормальных значений параметров оборудования в различных режимах проверки и т. п.

В качестве примера на рис. 12 приведен фрагмент командно-информационной мнемосхемы, предназначенной для проверки состояния комплекса радиотехнического оборудования. На мнемосхеме изображены положения органов управления в двух различных режимах проверки (режим P_1 обозначен сплошными линиями и темными заштрихованными знаками, P_2 — штриховыми линиями и светлыми знаками). Показаны три группы операций — для старшего оператора (СО) и одного из его помощников (*О-1*). Попутно заметим, что в данном случае при организации деятельности операторов существенным является требование их взаимозаменяемости.

Верхняя цепочка означает, что в режиме 1 старший оператор устанавливает тумблер блока *А1-1*, затем *А2-1* в верхнее положение, далее поворачивает левый переключатель блока *А3-1*, включает тумблер, проверяет наличие сигнала — должна гореть лампа *А4-1*, затем устанавливает правый переключатель блока *А3-1*, проверяет свечение всех табло блока *А5-2*, контролирует показатели прибора. Если на его шкале в первом режиме указывается величина 85 ± 5, то старший оператор выполняет переключения на блоке *А5-3*, устанавливает трафарет № 5 на осциллограф *А5-4*, сверяет с трафаретом форму сигнала, после этого переключает органы управления на *А5-5*, устанавливает трафарет № 21 на осциллограф *А5-6*. В том случае, если форма сигнала совпадает с трафаретом, оператор включает тумблер *А5-7* и проверяет на экране локатора *В-1* заданное положение контрольной метки.

После точного выполнения всех контрольных операций старшим оператором и его помощниками комплекс оборудования готов к работе.

Для того чтобы иметь основание рекомендовать более широко использовать командно-информационные мнемосхемы вместо текстовых инструкций в техническом контроле сложных систем, нашим аспирантом Ф. Л. Какузиным было проведено несколько серий экспериментов, в которых сравнивались эти два способа отображения информации. В опытах одни и те же реальные контрольные задачи решались одними испытуемыми по стандартным текстовым инструкциям, другими — по мнемосхемам, затем группы испытуемых менялись: одни от текста переходили к мнемосхемам, другие — наоборот [31].

В опытах участвовало 60 испытуемых — лица, проходящие в среднем специальном учебном заведении профессиональную подготовку к операторской работе по обслуживанию радиотехнических комплексов. Из них 20 (группа А) были «новичками» — начинали обучение заново, другие 20 (группа Б) уже имели значительный опыт по контролю оборудования с помощью текстов и мнемосхем; остальные 20 (группа В) ранее работали только по текстовым инструкциям. Экспериментальные задания были двух уровней сложности: в одном случае требовалось провести контроль оборудования, выполнив 40 операций, в другом — более сложном случае задание требовало выполнения 100 переключений и контрольных операций.

Всего было проведено 4 серии экспериментов. В первой серии участвовали испытуемые группы А. Десять из них начали выполнение задания на 100 операций по командно-информационной мнемосхеме, затем решали аналогичную задачу по текстовым инструкциям. Вторая половина группы А выполняла задания в обратном порядке. Данные опытов обеих подгрупп по КИМ и инструкциям суммировались и усреднялись. Эта группа в среднем затрачивала на выполнение всего задания по тексту $t = 103{,}6$ с, в том числе на выполнение переключений $t_1 = 19{,}4$ с. По мнемосхемам соответственно $t = 77$ с, $t_1 = 18{,}4$ с. Процент ошибок в среднем на задание составил по тексту 7,3%, по мнемосхемам 3,3%.

На рис. 13 показатели выполнения операций по текстовым инструкциям и мнемосхемам представлены в относительных единицах, причем результаты выполнения задания по текстовым инструкциям везде приняты за единицу, соответственно на обоих графиках (рис. 13, *а* и *б*) проведены горизонтальные сплошные линии $\bar{t} = 1$, включая $t = 1$ и $t_1 = 1$, и процент ошибок, равный 1.

A1-1 A2-1 A3-1 A5-2

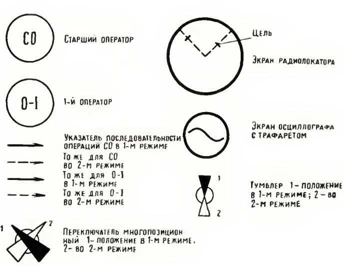
CO

$P_1 = 85 \pm 5$

$P_1 = 75 \pm 1$

A4-1

0-I



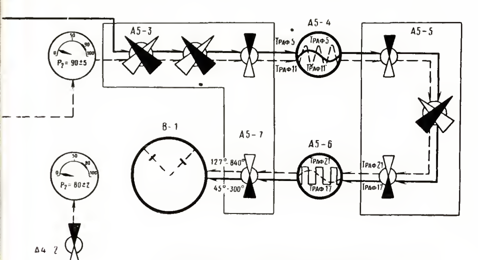


Показывающий прибор



Лампа

Табло



12 *Фрагмент командно-информационной мнемосхемы*

В скобках приведены абсолютные значения времени решения задач по инструкциям (рис. 13, *а*) и числа допущенных при этом ошибок (рис. 13, *б*).

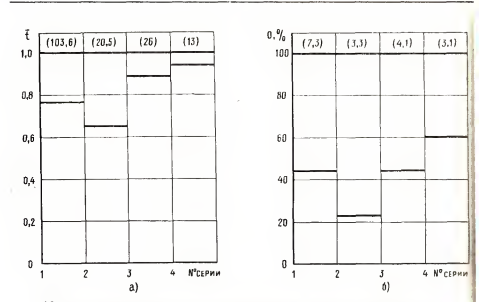
Во 2-й серии экспериментов участвовали курсанты, хорошо подготовленные и по текстовым инструкциям, и по мнемосхемам (группа Б), выполнявшие те же задания, что и «новички» в 1-й серии. В 3-й серии группа А выполняла задание по установке исходных условий на контролируемом оборудовании, в ходе которого необходимо было произвести 40 переключений. В 4-й серии группа В, длительно обучавшаяся работе по текстовым инструкциям, выполняла это же задание с 40 переключениями по текстам и по мнемосхемам.

Средние результаты выполнения заданий во всех сериях представлены в относительных единицах, как описывалось выше для 1-й серии, на рис. 13.

Результаты экспериментов показывают, что применение командно-информационных мнемосхем позволяет повысить эффективность действий операторов по сравнению с использованием текстовых инструкций на всех уровнях их профессиональной подготовки. Особенно показательна 4-я серия опытов: даже операторы, длительно обучавшиеся по текстовым инструкциям, более успешно выполняли знакомые им задания при переходе на командно-информационную мнемосхему (хотя разница, естественно, при этом меньше по сравнению с другими сериями опытов).

На основании результатов экспериментов командно-информационные мнемосхемы рекомендованы для систем контроля радиооборудования вместо традиционных текстовых инструкций.

Анализ деятельности операторов ряда объектов и результаты экспериментальных исследований показывают, что искусственное свертывание процессов принятия решений в полностью или



13 *Результаты экспериментального сравнения текстовых инструкций (данные приняты за единицу) и командно-информационной мнемосхемы:*

а — по времени решения задач; *б* — по числу ошибок

частично детерминированных системах специальным построением СОИ может служить эффективным средством улучшения показателей деятельности операторов, сокращения сроков их подготовки, снижения требований к обслуживающему персоналу и высвобождения квалифицированных операторов для решения более сложных, творческих задач, алгоритмы которых неизвестны.

Кроме описанных случаев командно-информационные средства отображения (КИСО) могут применяться для следующих целей:

1. Для обеспечения высокой скорости и точности аварийных переключений, выполняемых оператором, в том числе при подстраховке (дублировании) оператором блокировочных аварийных автоматов. КИСО может быть при этом компонентом сменного СОИ.

2. Когда оператор в ответ на любой появившийся сигнал или для планового изменения режима работы объекта должен выполнить соответствующую заранее известную последовательность управляющих действий.

Практика дает немало примеров того, что алгоритм управления объектом может быть известен, но нет средств автоматизации для реализации этого алгоритма. В двух случаях применение существующих автоматов нецелесообразно, поскольку операции выполняются очень редко. Примером может служить,

скажем, пуск насосов на перекачивающих станциях. Если станция не автоматизирована полностью, то имеющемуся на ней дежурному персоналу можно вменить в обязанность выполнение этих редких операций. Применение при этом КИСО значительно облегчит функции оператора и практически исключит возможность ошибок.

Общая идея практического применения КИСО заключается в том, чтобы представить оператору в наиболее ясной и наглядной форме все, что известно разработчикам об управлении объектом, способах и порядке действий в той или иной ситуации. Это особенно важно, если оператору предстоит работать в условиях дефицита времени, например, при выходе из строя автоматических устройств срочно принимать меры по предотвращению аварий или включаться в контур управления.

3. При необходимости в процессе выполнения человеком известной последовательности операций непрерывно или периодически оценивать общую обстановку, учитывать разнообразную информацию, не относящуюся непосредственно к управляемому процессу, вести контроль при высоком уровне шумов в информационной системе, опознавать сложные образы. В этом случае имеется в виду, что функции контроля не могут быть автоматизированы, поскольку неизвестны их алгоритмы, действия же, следующие за приемом и оценкой информации на каждом этапе, известны. На СОИ они должны быть обозначены с указанием их последовательности в зависимости от результатов оценки поступающей информации на каждом этапе выполнения всей операции. Задача наглядного отображения алгоритмов остро стоит, например, в энергетике, оператор при пуске блока мощностью 200—300 мВт производит до 1000 операций.

Для повышения быстродействия всей комплексной системы управления желательно уплотнять ввод команд оператора в машину. Однозначно определенная последовательность операций может вводиться как пакет сообщений нажатием одной кнопки с обращением к памяти вычислительной машины или, если применяются обычные средства автоматизации, с блокировкой операций.

4. Для предварительной проверки и отработки человеком-оператором алгоритмов работы автоматического управляющего устройства. В этом случае КИСО следует комбинировать с обычным СОИ (например, мнемосхемой), обеспечивающим оператора содержательной информацией для решения принципиально новых задач либо задач, ошибочно не включенных разработчиками в алгоритмы автоматического управления и потому не отображенных на КИСО.

5. В исключительных случаях КИСО могут применяться для поэлементного контроля за действиями технологических автоматов со стороны человека-оператора (вообще же такой контроль, требующий длительной концентрации внимания и

чрезвычайно утомительный, должен быть автоматизирован).

Резюмируя все сказанное в данном разделе, можно отметить, что свертывание процессов решения задач, обеспечивающее максимальную скорость оперативного управления в хорошо изученных ситуациях, может быть достигнуто путем наглядного представления требуемого результата решения — алгоритма его реализации — в виде командно-информационного средства отображения или многократным повторением задач в ходе обучения, длительность которого зависит от структуры средств представления оператору исходных условий задач.

В большинстве сложных систем, характеризующихся огромным числом возможных оперативных задач, явление свертывания процесса решения, как правило, не наблюдается. Учитывая это, лабораторное сравнение вариантов СОИ объекта по показателям деятельности испытуемых должно производиться в тот период их обучения, который ближе всего соответствует уровню обученности реальных операторов. Выбор этого момента может быть осуществлен либо в ходе специального планирования экспериментов — расчета стохастической модели обучения, либо путем проведения контрольных экспериментов с участием опытных операторов.

Глава

4

Информационные модели динамических управляемых процессов

12 Динамические свойства объекта и их влияние на деятельность оператора

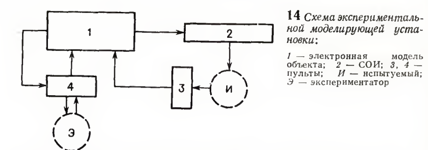
При выполнении человеком функции регулирования параметров технологических объектов или слежения по приборам за движущимися целями реакция на непосредственно воспринимаемый сигнал вследствие динамической инерционности управляемой системы оказывается запоздалой, поэтому оператор должен предвосхищать дальнейший ход процессов, оценивать скорость и даже ускорение изменения параметров и осуществлять опережающее воздействие на систему. Важно исследовать эффективность информационных моделей (приборов) разного типа как зрительной опоры антиципации изменения параметров объектов с различными динамическими свойствами.

Известны методические трудности психологического анализа процессов антиципации [42]. В нашем случае основным условием является возможно более точное воспроизведение в психологическом эксперименте динамических свойств объекта.

Возникают две практически важные исследовательские задачи: 1. Разработка метода объективного сравнения типов приборов с целью выбора наиболее рационального из них для контроля регулируемых параметров объекта с конкретными динамическими свойствами. 2. Исследование влияния динамических свойств объектов на сенсомоторную деятельность человека-оператора при регулировании параметров.

В связи с созданием многокомпонентного СОИ энергетического блока, автоматизированного с применением УВМ [1], было

[1] Подробное описание системы управления блоком и спроектированного нами СОИ приведено в гл. 10.



14 *Схема экспериментальной моделирующей установки:*

1 — электронная модель объекта; *2* — СОИ; *3*, *4* — пульты; *И* — испытуемый; *Э* — экспериментатор

проведено сравнительное исследование деятельности по регулированию параметров блока при отображении динамики их изменения на следующих типах приборов: регистрирующем (это прибор, снабженный шкалой, стрелочным указателем и диаграммным регистратором), показывающем (прибор со шкалой и стрелочным указателем), обычно применяемых на центральных щитах управления теплоэнергетическими объектами, а также на электроннолучевом индикаторе и нуль-приборе. Задача была затем расширена с целью формулирования рекомендаций по применению показывающих или регистрирующих приборов для объектов с различными динамическими свойствами.

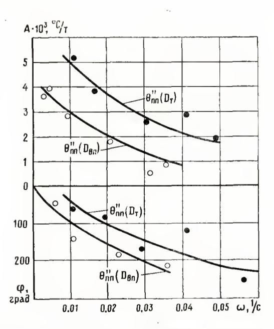
Для решения поставленных вопросов разработана экспериментальная методика и создана лабораторная моделирующая установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 14.

Основными ее элементами являются математическая модель объекта, СОИ и пульт управления.

С помощью экспериментальной моделирующей установки, кроме исследования СОИ и сравнения их вариантов, может решаться ряд других научно-исследовательских и практических задач, связанных, например, с обучением и подбором операторов, созданием моделей поведения человека-оператора, определением границ ручного управления объектами с различными динамическими свойствами и т. п. Изменяя тот или иной входной параметр модели, можно на приборе, подключенном к соответствующей точке модели, наблюдать изменение интересующего нас выходного или промежуточного параметра. Кроме того, на СОИ может быть выведена сигнализация отклонений любого параметра.

Для создания экспериментальной моделирующей установки, используемой для изучения в лаборатории системы «человек—машина», проведение аналитического исследования динамики блока, представляющего значительный объем работы, не обязательно. Могут использоваться данные, получаемые при расчете системы автоматического регулирования и оптимальных параметров ее настройки.

15 *Экспериментальное сравнение динамических свойств (амплитудно-фазовых характеристик) модели (на графиках изображены линиями) и реального котлоагрегата (изображены точками)*



Сравнительная оценка эффективности вариантов приборов проводилась на примере регулирования температуры перегретого пара.

Модель регулируемого участка — пароперегревателя котлоагрегата в исследованиях набиралась на аналоговых вычислительных машинах. Точность ее соответствия динамическим свойствам котлоагрегата проверена экспериментально (см. рис. 15). С различной частотой (ω) вносились возмущения в котлоагрегат и модель путем изменения подачи топлива ($D_{\text{т}}$) и впрыска охлаждающего конденсата ($D_{\text{вп}}$). Замеры амплитуды (A) и фазы (φ) отклонений температуры пара за перегревателем ($\theta''_{\text{пп}}$) показали сходство амплитудно-фазовых характеристик котлоагрегата и его электронной модели.

Таким образом, в последующих экспериментах по сравнению СОИ разных типов динамика процессов, отслеживаемых испытуемыми, была достаточно близка к динамике процессов в реальном объекте.

В качестве сравнивавшихся контрольно-измерительных приборов, по которым испытуемый следил за изменением регулируемого параметра, применялись электроннолучевой индикатор типа И-4М, нульприбор типа М-382 и автоматический показывающий и регистрирующий потенциометр типа ПСР-01 В опытах со слежением по шкале диаграмма ПСР-01 закрывалась шторкой, т. е. все ее характеристики, кроме наличия диаграммы — графического представления испытуемому изменений параметра, оставались неизменными, и этот же прибор служил уже в качестве показывающего с линейной горизонтальной шкалой.

В эксперименте фиксировались: время $t_{\text{рег}}$ от подачи светового сигнала до введения испытуемым величины регулируемого параметра в заданные пределы, а также интегральный критерий оценки качества процесса регулирования

$$I = \int_0^{t_{\text{рег}}} |U(t)|\, dt,$$

где $|U(t)|$ — абсолютная величина мгновенного значения параметра;

$t_{рег}$ — время регулирования, мин;

I — интегральный критерий оценки качества, В.

Очевидно, что I отражает величину суммарных технологических потерь в процессе регулирования параметра.

Статистические оценки, вычислявшиеся при обработке результатов экспериментов, — средние арифметические значения интегрального критерия I и время регулирования $t_{рег}$, а также их среднеквадратические отклонения σ_I и σ_t.

В экспериментах участвовало девять испытуемых, прошедших предварительную тренировку до стабилизации показателей регулирования. В расчет затем принимались результаты семи экспериментальных сеансов по каждому из четырех типов приборов.

Общие результаты статистической обработки данных, достоверность которых оценивалась с помощью критерия Стьюдента (доверительная вероятность 0,99), представлены в табл. 17.

Таблица 17

Результаты обработки данных по четырем типам приборов

Тип прибора	I		σ_I		$t_{рег}$		σ_t	
	Абсолютное значение, В	% от показателей по ПСР-01	Абсолютное значение, В	% от показателей по ПСР-01	Абсолютное значение, мин	% от показателей по ПСР-01	Абсолютное значение, мин	% от показателей по ПСР-01
Регистрирующий прибор ПСР-01	38	100	4,82	100	13,2	100	0,8	100
Нуль-прибор	52,1	137	4,8	152	16,7	125	1,02	128
Показывающий прибор ПСР-01 с зашторенной диаграммой	45,2	118	5,3	110	14,5	110	1,06	130
Электроннолучевой индикатор	58	152	6,3	180	17,9	129	1,4	175

На основе результатов экспериментов могут быть сделаны следующие выводы:

1. При регулировании выходного параметра модели пароперегревателя котлоагрегата-объекта, описываемого системой дифференциальных уравнений восьмого порядка, лучшие результаты по интегральному критерию оценки качества процессов регулирования и по времени регулирования достигнуты испытуемыми при контроле изменения параметра по показывающему и регистрирующему прибору. Далее идут результаты по показывающему прибору, затем по нуль-прибору и худшие — по электроннолучевому индикатору.

2. При отображении изменения регулируемого параметра в виде графика на диаграмме регистратора время регулирования сокращается более чем на 1 мин по сравнению с показывающим прибором и более чем на 4 мин по сравнению с электроннолучевым индикатором. Такая разница весома с точки зрения технологического процесса. Это означает, в частности, что в лабораторных экспериментах с применением математических

моделей управляемых объектов могут применяться реальные оценки взамен, скажем, микроинтервалов времени, измеряемых, например, при тахистоскопической методике и не играющих, как правило, существенной роли в системах регулирования, где скорость разгона параметров и даже время перестановки органов управления измеряются десятками секунд.

3. На диаграмму регистратора желательно заранее наносить линию, соответствующую заданной величине регулируемого параметра.

Подчеркнем один частный вывод: наличие на приборе диаграммы, отражающей предысторию моделируемого процесса и тенденцию его дальнейшего изменения, улучшает эффективность ручного регулирования по сравнению с этим же прибором, но без диаграммы. На этом выводе мы остановимся, поскольку он имеет немалое практическое значение и послужил основой дальнейших исследований.

Как говорилось вначале, приборы-регистраторы имеют ряд существенных недостатков по сравнению с показывающими (естественно, имеется в виду идентичность исполнения отсчетных частей: шкалы, стрелки и т. п.): большие вес и габариты, необходимость дополнительного обслуживания. Однако результаты проведенного исследования показали, что их применение оправдано для данного объекта, так как оно существенно улучшает качество процессов регулирования.

Остается открытым вопрос: для всех ли объектов такое улучшение будет иметь место? Экспериментальная задача была расширена путем увеличения набора объектов, различающихся динамическими свойствами (порядком описывающих дифференциальных уравнений).

Многие технологические управляемые объекты могут быть описаны математически и смоделированы как инерционные (апериодические) звенья разного порядка. В исследовании было взято одно («базовое») апериодическое звено и соединено последовательно с одним, двумя и т. д. другими такими же звеньями. На основе анализа ряда объектов в теплоэнергетике и химии в качестве базового было взято инерционное звено с постоянной времени $T = 0{,}5$ мин. Затем на аналоговых вычислительных машинах были набраны из таких звеньев объекты, описываемые дифференциальными уравнениями первого, второго, третьего, четвертого и пятого порядков. Коэффициент усиления равнялся единице. Величина возмущения изменялась в широких пределах.

По методике, описанной выше, были проведены эксперименты с целью сравнения эффективности регулирования выходного параметра каждого объекта при контроле по регистратору (ПСР-01) и показывающему прибору (использовался тот же прибор ПСР-01, но с зашторенной диаграммой), при этом он обозначался на графиках, как *шк*. Скорость движения диаграммной ленты как фактор, оказывающий в соответствии с выдвинутым предположением влияние на восприятие информации о ходе технологического процесса, варьировалась. Для нее были выбраны три дискретных уровня: $v_1 = 4800$ мм/ч,

$v_2 = 2400$ мм/ч; $v_3 = 800$ мм/ч (в протоколе все эти варианты отмечались как *шк*, v_1, v_2, v_3).

Результаты экспериментов, усредненные по всем испытуемым, приведены в табл. 18 и в виде графиков на рис. 16. Из табл. 18 видно, что разность показателей по интегральному критерию оценки качества регулирования (I) и времени регулирования (t) при разных способах подачи информации (*шк*, v_1, v_2, v_3) для объектов, описываемых уравнениями первого и второго порядков, или практически отсутствует, или во всяком случае статистически недостоверна.

Таблица 18

Результаты обработки экспериментальных данных с объектами разного порядка

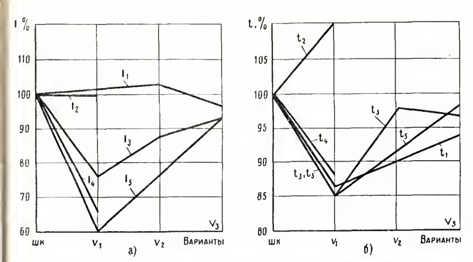
Порядок дифференциального уравнения, описывающего объект	Варианты	I		σ_I	$t_{рег}$		σ_t
		Абсолютная величина, В	% к $П$	Абсолютная величина, В	Абсолютная величина, с	% к $П$	Абсолютная величина, с
1	*шк*	0,85	100	0,2	52	100	8,4
	v_1	0,86	101	0,21	45	86	8,0
	v_2	0,87	102	0,3	47	90	7,9
	v_3	0,83	98	0,36	49	94	13,2
2	*шк*	1,1	100	0,51	71	100	10,1
	v_1	1,1	100	0,58	78	110	11,0
3	*шк*	1,7	100	0,4	91	100	9,5
	v_1	1,3	76	0,3	81	85	6,7
	v_2	1,5	88	0,08	89	98	5,3
	v_3	1,6	94	0,12	88	97	4,1
4	*шк*	2,3	100	0,4	114	100	12,1
	v_1	1,5	65	0,37	98	88	10,5
5	*шк*	3,0	100	0,35	151	100	11,4
	v_1	1,8	60	0,45	128	85	7,0
	v_2	2,35	78	0,39	137	91	9,1
	v_3	2,8	94	0,24	148	98	12,0

Достоверность разности для объектов, описываемых уравнениями третьего, четвертого и пятого порядков, оценивалась по критерию Стьюдента.

Для объектов, описываемых уравнениями четвертого и пятого порядков, разность показателей I и t по шкале (*шк*) v_1, v_2, v_3 достоверна с доверительной вероятностью не менее 0,95.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. По мере усложнения динамических свойств объекта, выражающегося в повышении порядка уравнения, возрастает необходимость в наглядном представлении изменения выходного параметра, поскольку, начиная с объектов третьего по-



16 *Результаты экспериментов при варьировании динамических свойств объектов:*

а — данные по интегральному (I_i) критерию оценки качества процессов регулирования; *б* — по времени (t_i) регулирования (данные по показывающему прибору приняты за 100%).

рядка, становится существенно различным качество процессов ручного дистанционного регулирования при контроле по показывающему и регистрирующему приборам.

Следовательно, применение регистрирующих приборов (шкала плюс диаграмма) по сравнению с показывающими (шкала) не дает выигрыша при регулировании объектов, описываемых как инерционные звенья первого и второго порядков ($T = 0,5$ мин), и существенно улучшает качество процессов регулирования для объектов, описываемых уравнениями третьего и высших порядков.

2. При необходимости улучшить качество процессов регулирования должна быть повышена скорость ленты, а при удовлетворительном качестве ручного регулирования при низкой скорости движения диаграммы регистратор может быть без ущерба для процессов регулирования заменен показывающим прибором.

Для определения скорости движения диаграммной ленты регистратора, устанавливаемого на оперативном СОИ, можно предложить следующую ориентировочную формулу: $v = 40/T$ мм/ч, где T — постоянная времени регулируемого контура (в часах).

Необходимо оговориться, что мы не рекомендуем на практике постоянно иметь на приборах такие же высокие скорости движения диаграммной ленты. Необходимо предусмотреть

автоматическую смену скоростей при отклонении параметра или подключение параметров при их дистанционном регулировании к специальным приборам с высокой скоростью движения диаграммы.

Вообще же в паспорте каждого прибора должны указываться его прямое назначение и варианты изменений характеристик при использовании его в различных условиях для разных функций оперативного и обслуживающего персонала.

Соотнесение временных и качественных характеристик сенсомоторных реакций с динамическими свойствами отслеживаемых человеком динамических объектов, выраженными в математической форме, может быть полезно в дальнейших более общих исследованиях процессов слежения с формальным описанием структуры и границ этих процессов.

С учетом результатов экспериментов этой серии при проектировании многокомпонентного средства отображения информации для блока ТЭЦ-21 Мосэнерго, автоматизированного с применением управляющей вычислительной машины (подробно см. в гл. 10), для регулируемых контуров с различными динамическими свойствами мы выбирали регистрирующие или показывающие приборы.

13 Снижение сложности решения задач комбинированием интегральных и детальных информационных моделей

Реальные значения таких важнейших факторов, обусловливающих сложность решения оперативных задач, как число элементов и связей между ними, которые оператор включает в процесс решения возникшей задачи, в существенной степени зависят от целеустремленности человека на этапе сбора исходной информации. Правильный предварительный выбор зоны расположения релевантных элементов, основанный на целостной оценке состояния объекта, во многом определяет дальнейший ход решения задачи, уровень ее субъективной трудности для оператора. Облегчению общей оценки состояния объекта служит применение интегральных СОИ. В настоящее время известно значительное число вариантов интегральных средств отображения информации.

Среди таких СОИ определенное распространение получили матричные системы представления оперативной информации [62, 114]. Общая их идея заключается в следующем. Мгновенное состояние управляемого технологического объекта, характеризующееся n параметрами, можно выразить как вектор

$X = \{x_1, \ldots, x_n\}$. В статике это состояние может быть представлено также через связи между параметрами, при этом каждый параметр рассматривается как функция всех $n - 1$ остальных:

$$x_1 = f_1(x_2, x_3, \ldots, x_n);$$

$$x_i = f_i(x_1, \ldots, x_{i-1}, x_{i+1}, \ldots, x_n);$$

$$x_n = f_n(x_1, \ldots, x_{n-1}).$$

Очевидная информационная избыточность такого представления определяется взаимосвязанностью явлений в технологическом объекте и, следовательно, отображающих их параметров.

С помощью разложения в ряд Тейлора можно выразить связь значений каждого i-го параметра с отклонениями остальных параметров объекта:

$$x_i = x_{0i} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \left(\frac{\partial x_i}{\partial x_j} \right)_{\substack{\Delta x_1 = 0 \\ \cdots \\ \Delta x_{j-1} = 0 \\ \Delta x_{j+1} = 0 \\ \cdots \\ \Delta x_n = 0}} \cdot \Delta x_j = x_{0i} + \sum_{j=1}^{n} c_{ij} \Delta x_j,$$

где x_{0i} — заданное (нормальное) значение параметра x_i;
c_{ij} — частная производная при нормальном значении всех остальных параметров;

$$c_{ij} = \left(\frac{\partial x_i}{\partial x_j} \right)_{\substack{\Delta x_1 = 0 \\ \cdots \\ \Delta x_n = 0}}.$$

На этой основе выведено матричное представление взаимосвязи между параметрами объекта:

$$\begin{vmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta x_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0, & c_{12}, \ldots, & c_{1n} \\ c_{21}, & 0, \ldots, & c_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ & & \\ & & \\ c_{n1}, & c_{n2}, \ldots, & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta x_n \end{vmatrix}$$

или

$$\Delta X = | c_{ij} \delta_{ij}^{-1} |^n \Delta X,$$

где ΔX — вектор-столбец применения состояния параметров $\{x_i\}$;

$$\delta_{ij}^{-1} = \begin{cases} 0 & (i = j) \\ 1 & (i \neq j). \end{cases}$$

Отсюда получается матричная характеристика взаимодействий между параметрами:

$$|c_{ij}| = \begin{vmatrix} 1, & c_{12}, \ldots, & c_{1n} \\ c_{21}, & 1, \ldots, & c_{2n} \\ c_{n1}, & c_{n2}, \ldots, & 1 \end{vmatrix}. \qquad (33)$$

Если (33) умножить на диагональную матрицу нормированных отклонений Δx_i контролируемых параметров, то получим матрицу, объединяющую заранее известные данные о структуре взаимосвязей между параметрами и текущую информацию об их отклонениях:

$$\begin{vmatrix} \Delta x_1, & c_{12}\,\Delta x_2, \ldots, & c_{1n}\,\Delta x_n \\ c_{21}\,\Delta x_1, & \Delta x_2, \ldots, & c_{2n}\,\Delta x_n \\ \cdot\;\cdot\;\cdot & \cdot\;\cdot\;\cdot & \cdot\;\cdot\;\cdot \\ c_{n1}\,\Delta x_1, & c_{n2}\,\Delta x_2, \ldots, & \Delta x_n \end{vmatrix}. \qquad (34)$$

В матричном СОИ используется то свойство матрицы (34), что элементы матрицы, лежащие слева от главной диагонали, отображают следствия связей предыдущих x_i с последующими, а элементы, лежащие справа от диагонали, — последующих x_i с предыдущими.

Человек-оператор, воспринимая информацию только от матричного СОИ, может принимать решения о способах нормализации состояния объекта на основании лишь тех данных о связях между параметрами, которые выявлены на стадии исследования и разработки СОИ. Такое СОИ практически не ассоциируется с технологическим объектом и само является для оператора как бы «объектом управления». Следовательно, матричное СОИ может квалифицироваться как условно-абстрактное.

О достоинствах и недостатках условно-абстрактных СОИ мы уже говорили. Как и все они, матричное СОИ облегчает поиск отклонившихся параметров и известных связей, но не позволяет осуществлять поиск новых, скрытых связей между параметрами объекта в ходе решения оперативных задач. Последнее требует применения ассоциативных СОИ.

На матричном СОИ отображаются только известные связи, все остальные принимаются равными нулю. Если число исследованных заранее связей относительно невелико и невыявленные связи могут играть весьма серьезную роль в различных непредвиденных ситуациях, в том числе при авариях, то фиксирование внимания оператора на известных и притом не существенных для этих ситуаций связях явно нецелесообразно.

В этом случае более целесообразно принять все связи неизвестными, т. е. условно представить в матрице все $c_{ij} = 0$. Тогда матрица (34) примет вид

$$\begin{vmatrix} \Delta x_1, & 0, \ldots, & 0 \\ 0 & \Delta x_2, \ldots, & 0 \\ \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot & \cdot \\ 0, & \ldots \ldots & \Delta x_n \end{vmatrix}. \quad (35)$$

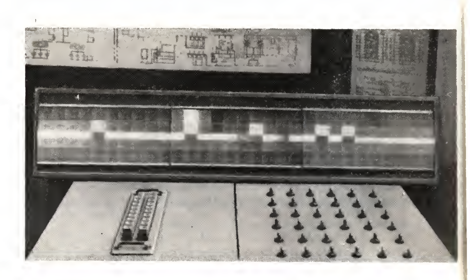
Вместо отклонений параметров Δx_i можно использовать значения самих параметров, выраженные в относительных единицах. Если при этом ввести по несколько m градаций (интервалов) значений, симметричных по отношению к заданному значению (при $\Delta x_i = 0$), то $n \times n$ матрица (35) может быть заменена компактной $n \times m$-матрицей (как правило, $n \gg m$):

$$\begin{vmatrix} \frac{x_1 + \Delta x_{1\,\max}}{x_1}, & \frac{x_2 + \Delta x_{2\,\max}}{x_2}, \ldots, & \frac{x_n + \Delta x_{n\,\max}}{x_n} \\ \cdot \cdot \cdot & \cdot \cdot \cdot & \cdot \cdot \cdot \\ \frac{x_1 + \Delta x_{1\,\min}}{x_1}, & \frac{x_2 + \Delta x_{2\,\min}}{x_2}, \ldots, & \frac{x_n + \Delta x_{n\,\min}}{x_n} \\ 1, & 1, \ldots \ldots & 1 \\ \frac{x_1 - \Delta x_{1\,\min}}{x_1}, & \frac{x_2 - \Delta x_{2\,\min}}{x_2}, \ldots, & \frac{x_n - \Delta x_{n\,\min}}{x_n} \\ \cdot \cdot \cdot & \cdot \cdot \cdot & \cdot \cdot \cdot \\ \frac{x_1 - \Delta x_{1\,\max}}{x_1}, & \frac{x_2 - \Delta x_{2\,\max}}{x_2}, \ldots, & \frac{x_n - \Delta x_{n\,\max}}{x_n} \end{vmatrix}. \quad (36)$$

Требование симметричности отклонений параметров, конечно, не обязательно, оно введено только для простоты написания матрицы (36).

Очевидно, что запись матрицы (36) условна, поскольку в каждом столбце в любой момент строго определен только один элемент, а именно отражающий интервал, в котором находится мгновенное относительное значение данного i-го параметра, однако считается, что определены также и отличны от 1 все элементы столбца, находящиеся между средней строкой и истинным значением $x_i \pm \Delta x_{i\,\min}$. Нетрудно заметить, что матрица (36) является удобной формой компактного представления относительных значений или величин отклонений параметров объекта, особенно когда из каждого члена матрицы вычитается 1 и средняя строка обращается в нули. Такой матрице соответствует техническая реализация в виде «темного», т. е. нормально (при отсутствии отклонений параметров) погашенного светового матричного индикатора.

В зависимости от задач оперативного управления допустимо дискретное представление x_i (или Δx_i) в виде нескольких уровней относительных отклонений в одну или в обе стороны от заданных значений или необходимо их аналоговое отображение.



17 *Экспериментальный образец «Компас-табло»*

Ниже мы рассмотрим варианты реализации этих случаев.

Если связи в матрице (34) приравнены к нулю только потому, что неизвестна их основная часть, то СОИ, воспроизводящее матрицу отклонений, необходимо комбинировать с ассоциативным СОИ, позволяющим оператору самостоятельно выявлять связи. Если же связи между параметрами действительно отсутствуют, то такой матричный индикатор отклонений может отображать полную оперативную информацию. Поскольку на таком СОИ информация об отклонении всех параметров объекта представляется в компактной, обобщенной форме, матричные индикаторы отклонений следует относить к типу интегральных СОИ.

На основе изложенного принципа матричного индикатора отклонений специально для комбинированного использования с ассоциитивными СОИ типа мнемосхем крупных технологических объектов и облегчения человеку-оператору ориентирования в мнемосхемах разработано компактное сигнальное устройство «Компас-табло» (рис. 17) [30]. «Компас-табло» позволяет оператору следить в ограниченной зоне непосредственно на пульте за общим состоянием объекта, воспринимать комплексные обобщенные сигналы о различных нарушениях режима, сравнивать сигналы по важности (по величине отклонения), выстраивать сигналы в очередь для обслуживания, выбирать наиболее критичные и быстро находить зону на мнемосхеме, где сосредоточена детальная информация о возникшей оперативной задаче, т. е., образно говоря, служить компасом в слож-

ной обстановке, характеризующейся множеством технологических параметров и связей между ними.

Применение такого информационного устройства направлено на уменьшение реальных значений факторов, обусловливающих сложность оперативных задач: K_{1P}, $K_{3P}^{п}$, $K_{3P}^{к}$, K_{7P}, K'_{7P}. Степень приближения значений этих факторов к теоретическим (K_{jT}) при использовании «Компас-табло» предсказать очень трудно, необходим эксперимент, в котором был бы определен выигрыш во времени и числе ошибок при решении задач, аналогичных тем, в которых выявлялись факторы сложности задач (см. гл. 2).

«Компас-табло» выполнено в виде матричной конструкции, состоящей из вертикальных столбцов и горизонтальных ячеек. Каждый вертикальный столбец относится к одному параметру и состоит из пяти ячеек (количество ячеек может быть и другим — оно зависит от числа различимых сигнализируемых градаций отклонения параметра). Число вертикальных столбцов соответствует числу автономно сигнализируемых узлов (объектов) или числу основных контролируемых параметров управляемой системы, нарушение которых указывает на возникновение события — оперативной задачи.

Средний ряд «Компас-табло» состоит из узких ячеек, окрашенных в зеленый цвет. Ячейки горят, когда соответствующие им параметры находятся в заданных пределах, например в 5%-ной зоне отклонения (пределы зоны выбираются по техническим условиям). Сверху и снизу от «линии спокойствия» расположены ячейки, которые засвечиваются желтым цветом, когда параметр выходит из допустимых пределов (например, в 10%-ную зону «технологического» отклонения). Желтый цвет — предупредительный. Сверху и снизу от желтых ячеек расположены красные ячейки, сигнализирующие об аварийном отклонении параметра.

Работа «Компас-табло» происходит следующим образом. Если все параметры в норме, т. е. их отклонения не превышают допустимых величин, горит четкая зеленая полоса. В случае отклонения от нормы какого-либо параметра гаснет соответствующая ему зеленая ячейка в сигнальном столбце и загорается желтая ячейка выше или ниже погасшего зеленого сектора в зависимости от направления отклонения параметра. При возникновении аварийного отклонения параметра загорается красная ячейка. Площадь желтой ячейки в 2 раза, а красной — в 3 раза больше площади зеленой ячейки.

«Компас-табло» может применяться не только совместно с моносхемой, но и самостоятельно или в комплексе с приборным щитом, телевизионными приемниками, электроннолучевыми знаковыми индикаторами и т. п.

Экспериментальный образец «Компас-табло» выполнен на миниатюрных лампах накаливания, но могут быть использованы и люминесцентные световые элементы.

Для управления «Компас-табло» разработано электронное логическое устройство управления. Все сигналы поступают на нормирующее входное устройство, с помощью которого они унифицируются. Далее нормированные сигналы подаются на входной коммутатор, с которого они поступают в аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Сигнал, преобразованный АЦП в цифровую форму, подается в блок сравнения, где он сравнивается по величине и знаку с выбранными из запоминающего устройства заданными значениями и пределами зон отклонения. В результате вырабатывается соответствующий сигнал, который либо оставит зеленый сигнал, если параметр в норме, либо включит желтую или красную ячейки сигнализации данного параметра сверху или снизу от средней строки.

В условиях реального объекта «Компас-табло» можно подключать к выходу информационной или управляющей вычислительной машины.

Оценка эффективности применения «Компас-табло» в комбинации с мнемосхемой проводилась экспериментально. В опытах использовались те же задачи и аппаратура, что и в исследованиях, описанных в гл. 2. Критерием оценки в данном эксперименте, наряду с общим временем решения и числом ошибок, служило время предварительной оценки состояния объекта, определения очередности обслуживания, поиска на мнемосхеме детальной информации, относящейся к данной оперативной задаче. В экспериментах участвовало восемь испытуемых — две группы по четыре человека. В первой серии опытов одна группа начинала эксперименты с обнаружения отклонившегося параметра по звуковому сигналу и загоранию символов на мнемосхеме, а другая группа при решении тех же оперативных задач имела дополнительное информационное средство — «Компас-табло». Во второй серии опытов группы испытуемых менялись информационными средствами.

Каждая серия состояла из 50 экспериментальных задач. Данные экспериментов показывают, что время выбора и обнаружения на мнемосхеме критического параметра уменьшается при наличии «Компас-табло» в среднем на 30% (доверительная вероятность результатов 0,95).

Анализ процессов решения задач испытуемыми показал, что действительное значение указанных выше факторов сложности задач при использовании «Компас-табло» уменьшается.

Расчетное уменьшение времени решения оперативных задач по уравнению множественной регрессии (28) при подстановке разностей значений факторов K_{jP} при использовании мнемосхемы (см. гл. 2) и мнемосхемы совместно с «Компас-табло» близко совпало со средним, полученным в опытах.

Анализ процессов решения оперативных задач выявил следующие средние изменения K_{jP}: $\Delta K_{1P} = 4$, $\Delta K_{3P}^{п} = 0{,}5$, $\Delta K_{3P}^{к} = 1$, $\Delta K_{7P} = 3$, $\Delta K_{7P}' = 2$. Выпишем часть уравнения (28) в разностях: $\Delta t = 0{,}53\Delta K_{1P} + 1{,}32\Delta K_{3P}^{п} + 0{,}76\Delta K_{3P}^{к} + 0{,}32\Delta K_{7P}'$.

После подстановки перечисленных выше значений ΔK_{jP} получим $\Delta t = 4{,}18$ с. Некоторое завышение ожидаемой разности может быть объяснено неучетом времени, затрачиваемого на осмотр «Компас-табло».

Выигрыш во времени решения задач от использования «Компас-табло» в данном случае невелик. Дополнительные эксперименты показали, что этот выигрыш растет при увеличении абсолютных угловых размеров мнемосхемы и числа отображаемых на ней детальных сигналов; в некоторых опытах, в том числе проведенных на объекте, выигрыш достиг $\Delta t = 21$ с. Отбор наиболее важных технологических, а иногда и комплексных параметров, выносимых на «Компас-табло» без обозначения связей между ними (нередко на табло намеренно выносятся только независимые параметры), может квалифици-

роваться как фильтрация информации, направленная на облегчение информационного поиска основных сигналов о нарушении технологических процессов.

В качестве критериев оценки различных методов фильтрации информации иногда применяются коэффициенты эффективности информационного поиска, абсолютной стоимости и удельной стоимости [106].

Коэффициент эффективности информационного поиска ($K_Э$) выражается как отношение времени информационного поиска T_0 при отображении информации в «абсолютно неупорядоченном» виде ко времени поиска на основе исследуемого метода отображения информации $T_М$. Если принять объем отображения равным N двоичных единиц, то при удельных затратах времени на обнаружение t с/бит коэффициент эффективности выразится как

$$K_э = \frac{T_0}{T_М} = \frac{Nt}{T_М}.$$

Коэффициент абсолютной стоимости метода фильтрации информации представляет собой отношение стоимости реализации устройства отображения информации на основе исследуемого метода ($S_М$) к стоимости устройства с неупорядоченной информацией (S_0), т. е.

$$K_С = \frac{S_М}{S_0}.$$

Коэффициент удельной стоимости представляет собой отношение коэффициента абсолютной стоимости метода фильтрации информации к коэффициенту эффективности информационного поиска:

$$K_У = \frac{K_С}{K_Э}.$$

На «Компас-табло» весь массив информации из N первичных сигналов разбит на n групп, в каждой из которых сигналы обобщаются по каким-либо признакам. В этом случае оператор постоянно просматривает не всю информацию из N сигналов, а только обобщенные сигналы и одну из требуемых групп из N/n сигналов, если возникает необходимость в детализации информации об обстановке. При этом время информационного поиска может быть оценено как

$$T = \left(\frac{N}{n} + rn\right) t,$$

где r — число обобщенных сигналов в группе;

t — время, затрачиваемое на поиск одного сигнала.

Коэффициент эффективности информационного поиска может быть представлен как

$$K_Э = \frac{T_0}{T} = \frac{Nt}{\left(\frac{N}{n} + rn\right) t} = \frac{N}{\frac{N}{n} + rn}.$$

Стоимость устройства типа «Компас-табло» с выводом информации на индивидуальные места по этому методу [106] определяется из выражения

$$S = \frac{N}{2} S_В + (N + n) S_{y_2} + (N + n) S_{И2} =$$

$$= \frac{N}{2} S_В + (N + n)(S_{y_2} + S_{И2}),$$

где S_{y2} и $S_{И2}$ — соответственно стоимость устройства управления одним индикатором и одного индикатора в случае отображения информации при применении рассматриваемого метода;

$S_В$ — стоимость вентиля для передачи одного сигнала;

$\frac{S_В}{2}$ — стоимость устройства обобщения информации, отнесенная к одному первичному сигналу.

Поскольку стоимость устройства отображения информации в абсолютно неупорядоченном виде равна $S_0 = N(S_{y1} + S_{И1})$, то коэффициенты абсолютной стоимости методов фильтрации информации могут быть оценены исходя из следующего выражения:

$$K_С = \frac{\frac{1}{2} NS_В + (N+n)(S_{y_2} + S_{И2})}{N(S_{y_1} + S_{И1})},$$

где S_{y1} и $S_{И1}$ — соответственно стоимость устройства управления одним индикатором и одного индикатора в случае отображения информации в абсолютно неупорядоченном виде.

В нашем случае устройство отображения выполняется с использованием однотипных элементов, т. е. $S_{И1} = S_{И2} = S_И$; $S_{y1} = S_{y2} = S_y$, тогда коэффициент абсолютной стоимости метода фильтрации информации

$$K_С = \frac{\frac{1}{2} NS_В + (N+n)(S_y + S_И)}{N(S_y + S_И)} \approx 1 + \frac{n}{N} + \frac{1}{2} \cdot \frac{S_В}{S_y + S_И}.$$

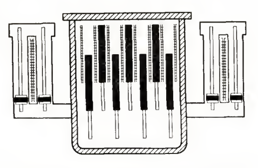
Из этого выражения видно, что при любых условиях $K_С > 1$, что дополнительно свидетельствует о целесообразности применения матричных индикаторов отклонений типа «Компас-табло».

Проектируя СОИ, необходимо стремиться обеспечить не только снижение длительности первоначального этапа поиска оператором зоны СОИ, где сосредоточена детальная информация, но и процесса сбора и оценки всей информации, относящейся к возникшей задаче. С этой целью нами был предложен способ разделения во времени информации об объекте в зависимости от того, какая часть объекта, какой технологический контур со всей относящейся к нему информацией на мнемосхеме интересует оператора в связи с конкретной возникшей задачей. Этот способ реализован нами посредством так называемых сменных мнемосхем (см. п. 9), которые могут рассматриваться как выдача на СОИ, например, типа знакогенерирующего индикатора «дисплея», комплекса информации (графического «файла», подготовленного в ЭВМ специально для облегчения человеку решения данной оперативной задачи).

С другой стороны, в некоторых случаях интегральное СОИ может не только позволять следить в целом за состоянием объекта, но и отображать одновременно всю информацию, необходимую для решения оперативной задачи и контроля за результатами управляющих воздействий оператора на объект, например, при дистанционном регулировании технологических параметров.

В этом смысле традиционные индивидуальные контрольно-измерительные приборы имеют серьезные недостатки, по-

18 *Групповая динамическая информационная модель (ГДИМ) атомного реактора*



скольку они рассеивают внимание оператора и чрезвычайно затрудняют длительное слежение за динамикой процессов в управляемом объекте.

В качестве альтернативы таким прибором может быть использован изложенный выше принцип матричного индикатора отклонений, но в отличие от дискретного «Компас-табло» — с отображением динамики изменения величины параметров в аналоговой форме, необходимой при ручном регулировании параметров объекта человеком-оператором. Эта идея может быть реализована, в частности, в виде групповой динамической информационной модели (ГДИМ) атомного энергетического реактора (АЭР), которая показана на рис. 18. Наряду с ГДИМ и стандартными приборами — стрелочными указателями положения в экспериментах использовались также специально разработанные многострелочные приборы.

Хронометраж деятельности операторов АЭР показал, что активные действия с органами управления, связанные с точным считыванием показаний приборов, занимают лишь 10—15% рабочего времени. Основную часть времени оператору требуются грубые качественные данные, притом не столько об отдельных органах, сколько об объекте в целом.

ГДИМ представляет собой стилизованный вертикальный разрез атомного реактора с перемещающимися вертикально (как и в натуре) органами управления. Здесь же нанесена шкала, на которой отмечено небольшое число опорных значений положения органов.

Расстояние от оператора до ГДИМ в опыте было равно 1700 мм, ее угловые размеры: 16° в вертикальной плоскости и 25° в горизонтальной. Угловые размеры делений и цифр шкал ГДИМ равны угловым размерам этих же элементов стрелочных приборов. Освещенность панелей 200 лк.

Главным требованием к лабораторному оборудованию являлось в данном случае возможно более точное моделирование деятельности оператора, обстановки реального операторского пункта и, что особенно важно, динамических свойств управляемого объекта. Для воспроизведения наиболее существенных

свойств управляемого объекта в экспериментальную установку были включены электронная модель объекта и реальная аппаратура логической системы управления (рис. 19). Операторский пункт был выполнен максимально приближенно к реальному (рис. 20), о чем свидетельствует тот факт, что после завершения опытов вся аппаратура была установлена на действующем объекте. Управление состоянием модели объекта и внесение в нее возмущений (отклоняющих воздействий) производилось по программе. Блок регистрации служил для измерения и фиксации скорости решения экспериментальных оперативных задач испытуемыми.

Предварительно были произведены аналитические расчеты вероятных затрат времени испытуемыми на решение задач по оценке состояния реактора по каждому из трех типов средств отображения.

В соответствии с задачей сравнения типов СОИ из полного расчета временны́х затрат оператора, всесторонне исследованного в [89], нами были выбраны те операции, время выполнения которых изменяется при переходе от одного из этих типов СОИ к другому.

1. Время восприятия показаний приборов $t_{\text{вп}}$.

2. Время выявления сигналов $t_{\text{вс}}$.

3. Время формулирования решения $t_{\text{фр}}$.

4. Разница в общем времени выполнения данной группы операций Δt_0.

Для расчета этих временны́х показателей В. И. Николаевым [89] выведены следующие формулы:

1. $t_{\text{вп}} = A_i + \tau_{\mu'} A_i' + \sum_{M_i} \tau_\mu$,

где A_i — число предварительно осматриваемых приборов;

$$A_i = \frac{(m_i - m_i')(1 - p_{0i})}{(m_i - m_i' - 1)\, p_{0i}' + 1},$$

здесь m_i — число приборов в основной группе M_i;

m_i' — число приборов в расширенной группе M_i';

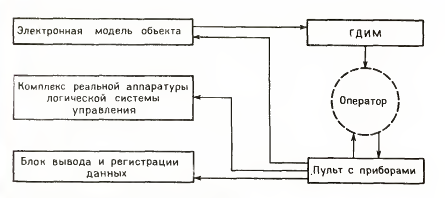
p_{0i} и p_{0i}' — вероятности осмотра одного прибора соответственно из групп M_i и M_i';

τ_1 — время предварительного осмотра одного прибора;

τ_μ — время единичной фиксации глаз при осмотре приборов;

$$\tau_{\mu'}' = \frac{1}{m_i - m_i'} \sum_{\mu'=1}^{m_i} \tau_\mu.$$

 2. $t_{\text{вс}} = \tau_{yy} + \tau_{\text{л}_1}$,



19 *Блок-схема экспериментальной установки*

20 *Вид экспериментальной установки (фрагмент — щит и пульт оператора испытуемого)*

где τ_{yy} — время выборов сигналов;

$\tau_{yy} = \psi_{yy} H(y)$,

здесь ψ_{yy} — постоянный коэффициент с размерностью дец/с;
$H(y)$ — энтропия выбора;
$\tau_{л_1}$ — время, затраченное на иррелевантную информацию;

$\tau_{л_1} = \psi_{yy} I_{л_1}(yy)$;

$I_{л_1}(yy) = H(y) + A_i [H^*(y) + 1]$,

где

$$H^*(y) = -\sum_{\rho=1}^{r} p(\rho) \ln p(\rho),$$

здесь r — число групп однотипных состояний;
$p(\rho)$ — вероятность ρ-й группы состояний.

Для показывающих приборов В. И. Николаевым [89] выведено соотношение

$$H(y) = \lg \frac{x_{\max} - x}{2\delta},$$

где $x_{\max}$ — максимальное значение шкалы;
x — установленное значение параметра;
δ — абсолютная погрешность, с которой оператор определяет значение параметра.

3. $t_{фр} = \psi_{zz}(I')[1 + 0{,}03kI'(zz)] I'(zz)$,

где

$$I' = -\varkappa \sum_{M_i} \ln \{p(\mu) p_\mu(y_i) p_{\mu y_i}(x_i)\},$$

здесь

$$\varkappa = \frac{\sqrt{\sum_{M} \Delta x_i^2}}{\sqrt{\sum_{M_i} \Delta g_i^2}}.$$

В данном случае коэффициент значимости сигналов $\varkappa$ равен 1.

4. $\Delta t_0' = t_0' - t_0''$,

где t_0' — время выполнения контрольной группы операций по первому варианту СОИ;
t_0'' — время выполнения тех же операций по второму варианту СОИ.

Приведем окончательные значения времени решения экспериментальных задач по каждому исследовавшемуся типу СОИ, рассчитанные по формулам В. И. Николаева, для случая отклонений четырех параметров (положения регулирующих органов).

Приведем средние значения общего времени, а также интервалы значений, соответствующие доверительной вероятности $p = 0{,}95$:

А. Стандартные стрелочные приборы — общее время $\overline{t_0} = 13{,}53$ с; $12{,}24 < t_0 < 14{,}82$ с.

Б. Трехстрелочные приборы — общее время $\overline{t_0} = 8{,}16$ с; $8{,}08 < t_0 < 8{,}20$.

В. Групповая динамическая информационная модель — общее время $\overline{t}_0 = 7{,}64$ с; $7{,}50 < t_0 < 7{,}83$.

Таким образом, по расчетам при одновременном отклонении четырех параметров наиболее быстрая оценка состояния объекта должна быть по ГДИМ, несколько худшие показатели ожидаются по трехстрелочным приборам и наибольшее время оценки — по стандартным приборам, используемым на подобных объектах в настоящее время.

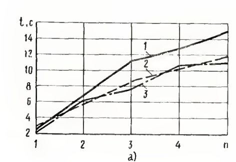
В опытах участвовало 9 испытуемых в возрасте от 25 до 40 лет, с нормальным зрением, не связанных профессионально с работой за пультом управления. Все испытуемые были разделены на три группы по 3 человека. Первая группа испытуемых начинала опыты со считывания информации по индивидуальным приборам, вторая — по групповой динамической информационной модели, третья — по многострелочным приборам. Затем группы менялись средствами отображения информации. В ходе опытов регистрировались следующие данные: время считывания, действительные значения параметров модели объекта, отраженные на приборах, а также значения, считанные испытуемыми. В течение одного эксперимента испытуемый должен был оценить 30 различных состояний объекта.

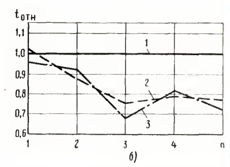
Основное внимание уделялось сравнению эффективности действий испытуемых с индивидуальными однострелочными приборами, расположенными на пульте, и групповой динамической информационной моделью на щите. Всего было проведено 108 опытов, в которых решено 2340 оперативных задач.

По результатам экспериментов рассчитано среднее время оценки оператором состояния системы управления и защиты атомного энергетического реактора (СУЗ АЭР) при считывании показаний с трех вариантов средств отображения информации. Данные приведены на рис. 22 (*1* — оценка по серийному прибору, *2* — по многострелочному прибору, *3* — по ГДИМ).

Расчеты показали, что значение доверительной вероятности средних разностей результатов опытов с тремя вариантами СОИ по всем испытуемым находится в пределах 0,95—0,99.

Наилучшие результаты по времени общей оценки состояния параметров объекта получены при применении групповой динамической информационной модели. При этом длительное наблюдение за ее показаниями производится оператором без напряжения. Несколько хуже временны́е показатели у многострелочных приборов, наихудшие — у однострелочных. Преи-





21 *Сравнение вариантов СОИ по времени оценки оператором состояния СУЗ АЭР*:

а — в абсолютных единицах; *б* — в относительных

имущество ГДИМ тем значительнее, чем больше параметров объекта должен контролировать человек. При использовании ГДИМ отдельные показания интегрируются в обобщенный динамический образ, воспринимаемый как единое целое. ГДИМ обладает свойством наглядности («картинности»).

Наибольшая точность считывания показаний при дефиците времени, определенном скоростью протекания процессов в объекте, достигнута при применении трехстрелочных приборов, размещенных на пульте.

На практике для объектов подобного класса можно рекомендовать применять групповые динамические информационные модели для длительного наблюдения за общим состоянием объектов и многострелочные приборы с четким кодированием стрелок — для периодического точного определения количественных величин параметров.

Исследования показали, что применение интегральных СОИ типа «Компас-табло» или ГДИМ в комбинации с детальными информационными средствами может служить средством повышения эффективности решения оперативных задач.

14 Психологические принципы выбора структуры СОИ, снижающие сложность решения оперативных задач

На основе результатов экспериментов, описанных в разделе I, может быть сформулирован ряд психологических принципов выбора состава и структуры графических информационных моделей.

1. Из полученных данных видны существенное влияние на показатели деятельности человека-оператора общего числа значимых связей (K_{1P}) и числа отдельных типов связей ($K^{п}_{3P}$ и $K^{к}_{3P}$), а также тесная взаимозависимость этих факторов с K_{7P} и K'_{7P} ($r_{K_{1P}K_{7P}} = 0{,}79$; $r_{K_{1P}K'_{7P}} = 0{,}80$; $r_{K_{1P}t} = 0{,}8$; $r_{K_{1P}\xi} = 0{,}76$; $r_{K_{1P}N} = 0{,}79$; $r_{K^{п}_{3P}N} = 0{,}93$; $r_{K^{п}_{3P}t} = 0{,}81$ и т.д.).

Снижению реальных значений этих факторов сложности оперативных задач может способствовать использование при выборе состава мнемосхемы принципа оптимальной лаконичности. Объем информационных элементов и связей, выносимых на мнемосхему в соответствии с принципом оптимальной лаконичности, может быть рассчитан по методу минимизации вероятных потерь в управляемой системе, описанному нами совместно с М. А. Артибиловым и В. А. Поляковым [4] на примере расчета K_{jP} мнемосхемы крупной объединенной энергосистемы Урала. При проектировании мнемосхемы объединенной энергосистемы Закавказья, руководствуясь принципом оптимальной лаконичности, нам удалось снизить сложность оперативных задач путем уменьшения K_{1P} и K_{7P} примерно на 30% за счет сокращения общего числа отображенных энергообъектов и линий электропередачи [21]. В то же время жесткая структура, отсутствие зрительного выделения актуальных контуров затрудняют работу диспетчеров.

2. Во многих случаях число элементов уменьшить не удается. Если при этом анализ деятельности операторов показывает, что наряду с оценкой общего состояния системы и координацией работы входящих в нее объектов оператор часто решает задачи, к которым относятся элементы и связи, локализованные в отдельных объектах, то компактная группировка символов, отображающих каждый отдельный объект и зрительное обособление такой группы от других, позволяет уменьшить реальные значения факторов K_{jP}, облегчая оператору сосредоточение внимания на релевантных задачам элементах СОИ. Такой принцип построения СОИ можно назвать *принципом автономности*. Этот принцип коротко формулируется так: участки и группы элементов СОИ, относящиеся к автономно контролируемым и управляемым агрегатам или объектам, следует обособить от других.

Возможно несколько формальных методов определения состава таких автономных групп элементов. Одним из простейших является матричный.

Пусть объект X характеризуется состоянием n параметров: $X = \{x_1, \ldots, x_n\}$, связи между которыми C_{ij} можно представить $n \times n$ матрицей с главной диагональю, составленной из параметров $x_1, \ldots, x_n$. Задача определения состава автономных групп параметров сводится к выбору нижней границы связи между параметрами C^*_{ij}, так что все $C_{ij} < C^*_{ij}$ принимаются

равными нулю, и расположению элементов главной диагонали группами, внутри которых $C_{ij} > C^*_{ij}$. Тогда полная матрица связей между параметрами объекта окажется разбитой на m квадратных матриц:

$$X = \left| \begin{array}{cccc} \begin{array}{ccccc} x_k & C_{kl} & C_{km} & \ldots & C_{kp} \\ C_{lk} & x_l & C_{lm} & \ldots & C_{lp} \\ C_{mk} & C_{ml} & x_m & \ldots & C_{mp} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ C_{pk} & C_{pl} & C_{pm} & \ldots & x_p \end{array} & & & \\ y_1 & & & \\ & y_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & y_m \end{array} \right|.$$

Каждую из m условно несвязанных матриц (вообще в реальном объекте эти матрицы частично перекрываются, поскольку автономные узлы объекта имеют связи) обозначим через y_i и представим в виде сокращенной диагональной матрицы:

$$X = \{y_1,\ y_2, \ldots,\ y_m\} = |\, y_i \delta_{ik} \,|^m,$$

где δ_{ik} — символ Кронекера;

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1 & (i = k) \\ 0 & (i \neq k). \end{cases}$$

3. Частой причиной включения лишних элементов в круг анализируемых при решении задачи является наличие на СОИ несущественных с точки зрения оперативного управления подробностей о конструктивных особенностях объектов, излишнее разнообразие в способах условного обозначения сходных явлений. Снизить вредное влияние подобного «визуального шума» на оператора можно, используя *принцип обобщения и унификации*. На основе этого принципа нами была предложена широко используемая теперь символика для мнемосхем тепловых электростанций (см. гл. 10). Принцип был применен нами при проектировании мнемосхемы системы «Старт» (см. там же).

4. Одновременно с изъятием лишних объектов по принципу лаконичности и несущественных подробностей по принципу обобщения и унификации уменьшению значений факторов K_{jP} может способствовать зрительное выделение наиболее важных и часто требующихся при решении оперативных задач элемен-

тов. К ним обычно в первую очередь относятся элементы контроля и управления. Можно сформулировать соответствующий *принцип акцента на элементах контроля и управления*: независимо от истинных размеров элементов контроля и управления их символы на СОИ, например на мнемосхеме, должны выделяться зрительно очень четко как наиболее важные для оценки оператором состояния объектов, принятия и реализации решения. Эффективность этого принципа проверялась при проектировании и анализе опыта работы операторов с мнемосхемами ТЭЦ-21 Мосэнерго и Воскресенского химкомбината.

5. Принятие и особенно реализация решения во многом зависят от легкости взаимного соотнесения информационных элементов и органов управления. Этому требованию соответствует *принцип пространственного соотнесения элементов контроля и управления*, представляющий собой модификацию более общего психологического принципа совместимости стимула и реакции для сложных видов деятельности, связанных с принятием оперативных решений. Этот принцип был апробирован нами, в частности, при реконструкции мнемосхемы одного из крупных производств Щекинского химкомбината, что позволило существенно повысить эффективность деятельности операторов (см. гл. 10).

6. Более быстрому и точному нахождению оператором на СОИ требуемых информационных элементов при оценке ситуации и на других этапах решения задач способствует подбор специальных способов кодирования элементов. *Принцип использования ассоциаций и стереотипов* основан на преимущественном применении на СОИ символов, ассоциирующихся с обозначаемыми объектами, процессами и явлениями, взамен абстрактных условных знаков и учете стереотипных реакций при организации сенсомоторной деятельности. В качестве примера построения символики по этому принципу можно назвать предложенные нами мнемознаки технологических параметров, ассоциирующиеся с общепринятыми буквенными обозначениями этих параметров, а также символы оборудования на мнемосхеме слябинга 1150.

7. Наряду с автономностью отдельных объектов и элементов управляемой системы иногда правомерно понятие автономности отдельных стадий решения оперативных задач. Анализ деятельности диспетчеров ряда систем показал, что нормализация режима работы системы может распадаться на такие стадии: оценка состояния основной схемы (интегральная информация), выбор объектов с нарушенными режимами, поочередное изучение состояний этих объектов и воздействие на них (детальная информация), нормализация схемы работы системы (интегральная информация). При такой структуре деятельности оператора в построении СОИ может быть использован *принцип стадийности*: детальная и интегральная информация, требующаяся оператору на четко разграниченных стадиях решения

оперативных задач, может разделяться на СОИ в пространстве (одновременное отображение в разных зонах СОИ) или во времени (последовательное отображение различной информации). Сравнительная оценка влияния на уровень сложности задач различных вариантов практической реализации принципа стадийности на мнемосхемах проведена в экспериментах по решению сложных диспетчерских задач, возникающих при управлении объединенной энергосистемой.

8. Уменьшению числа оперативных единиц восприятия (K_{10P}) и коррелированных с ним других факторов сложности задач [из корреляционной матрицы факторов (табл. 6) видно, что K_{10P} — один из центральных факторов по коррелированности с другими] способствует объединение отдельных семантически связанных информационных элементов в целостно воспринимающиеся группы. Этому должно способствовать широкое применение при построении СОИ *принципа структурности*.

С целью общей оценки эффективности сформулированных принципов построения СОИ был проведен качественный анализ их влияния на величины факторов K_{jP} путем сопоставления процессов решения операторами аналогичных задач по ранее существовавшим мнемосхемам и мнемосхемам, построенным с учетом перечисленных принципов, в условиях реальных объектов и в лаборатории. Необходимо отметить, что по числу охватываемых факторов принцип структурности СОИ имеет важное значение. Реализация этого принципа подробно рассмотрена нами применительно к мнемосхемам в гл. 9 и 10.

9. Отрицательное влияние избытка информации на показатели решения оперативных задач по мнемосхемам доказано в экспериментальном исследовании, в котором идентичные задачи решались по полной и сменным мнемосхемам объекта. Наряду с этим исследован метод зрительного выделения информации, непосредственно относящейся к задаче, путем высвечивания на мнемосхеме актуальных контуров объекта, как средство снижения значений K_{jP}.

10. Существенное снижение реальных значений факторов сложности оперативных задач может быть достигнуто путем свертывания процессов решения либо в ходе специального обучения, либо при отображении алгоритмов реализации решений.

11. Разработан ряд методов рационального комбинирования и разделения интегральной и детальной информации, индивидуальной и избирательной систем реализации решений.

12. Основным психическим процессом при слежении за сложными динамическими объектами является антиципация, для облегчения которой следует в выявленных случаях наглядно графически отображать изменение параметров.

13. Необходимо расширить круг исследуемых факторов сложности оперативных задач, включив сюда темп подачи информации человеку и внешние условия его деятельности.

2

Влияние темпа предъявления информации человеку-оператору и условий внешней среды на процессы решения оперативных задач

Психологический анализ деятельности операторов в реальных и лабораторных условиях показал, что существенным резервом снижения сложности решения человеком оперативных задач является оптимизация объема отображаемой информации. Выдвинута проблема оперативной адаптации информационных систем с учетом конкретных показателей деятельности человека, предложены пути решения этой проблемы, в частности основанные на применении информационно-демпфирующих систем с регулируемой интенсивностью потока сигналов, поступающих на средство отображения. Одно из важнейших положений, сформулированных советской психологической школой, утверждает системный механизм взаимодействия анализаторов в процессе многомодального восприятия. Исходя из этого сделан вывод, что при синтезе систем отображения информации необходимо учитывать не только информационные факторы, но и совокупность внешних условий, действующих на человека-оператора. Расширение круга параметров, варьируемых в экспериментах, позволило выявить ряд фактов сложного, нелинейного влияния внешних условий на показатели деятельности оператора и сформулировать проблему поиска информационных предпосылок высокой стабильности его деятельности в широком диапазоне изменения условий.

Глава

5

Регулирование темпа подачи информации человеку-оператору как средство снижения сложности оперативных задач

15

Проблема оптимизации объема информации, представляемой человеку-оператору

В гл. 2 было выявлено, что величина оперативного объема отображения, выраженная как число воспринимаемых человеком информационных элементов, относящихся к решаемой задаче, является одним из факторов, обусловливающих сложность задачи. Однако там мы были вынуждены ограничиться в основном качественным анализом влияния этого фактора на деятельность оператора.

Количественное исследование оптимальной величины оперативного объема отображения более строго возможно на примере средств отображения информации, состоящих из одинаковых информационных элементов, скажем, щитов управления, укомплектованных однотипными контрольно-измерительными приборами. Мнемосхемы, характеризующиеся большим разнообразием информационных элементов, взаимосвязей между ними и типов оперативных задач, представляют собой слишком сложный экспериментальный материал, не поддающийся пока унифицированной количественной оценке, необходимой для соотнесения величин оперативных объемов отображения с показателями деятельности оператора.

Кроме того, в практике организации оперативного управления наряду с типичной для мнемосхем проблемой оптимального соотношения визуального отображения условий возникшей оперативной задачи и иррелевантного ей информационного фона весьма остро стоит вопрос о соотношении визуального отображения условий нескольких одновременно возникших

на объекте независимых оперативных задач. Такие ситуации особенно типичны для тех систем, в которых задачи оператора относительно просты и чаще всего связаны не с принятием ответственных решений, а с сенсомоторными реакциями. Такое положение вырабатывалось длительное время в самой практике управления системами: одновременное успешное решение двух сложных задач в условиях дефицита времени, как правило, невозможно. Это нашло отражение в принципе «неналожения аварий»: на многих объектах оператор по инструкции имеет право при одновременном возникновении двух и более серьезных нарушений не заниматься определением нарушений и их устранением, а экстренно отключать агрегаты, не считаясь с потерями от остановки и лишь спасая оборудование от разрушения.

С другой стороны, во многих системах, где операторы осуществляют слежение за движущимися объектами, регулирование параметров, настройку каналов связи и т. п., выход из нормы одновременно нескольких параметров — явление обычное. В таких системах задача выбора более срочных сигналов, выстраивание всех сигналов в очередь для обслуживания возлагается сейчас на оператора: информация о всех нарушениях предъявляется ему одновременно. Такой подход зачастую обусловливает чрезвычайно напряженную деятельность оператора и не позволяет добиваться высокой эффективности работы системы в целом.

Известен ряд формальных, пригодных для машинной реализации методов сравнительной оценки экстренности сигналов. Один из простейших методов основан на вычислении относительной величины отклонений параметров. Наличие этих методов позволяет поставить вопрос о создании такой системы, в которой предварительный анализ сигналов будет осуществляться машиной, а оператору в каждый момент подается некоторое оптимальное, с точки зрения эффективности деятельности, число сигналов, т. е. система будет осуществлять регулирование интенсивности потока сигналов, поступающих к оператору.

Таким образом, существующей традиции создания систем, в которых оператор получает сразу всю информацию, можно выдвинуть в качестве альтернативы предварительную обработку информации с целью оптимизации оперативного объема отображения.

Результаты исследований различных авторов и проведенный нами анализ деятельности операторов при ликвидации аварий позволили предположить, что при работе оператора, связанной с высокой скоростью сенсомоторных реакций, например при регулировании параметров по приборам, может быть найден некоторый оптимальный оперативный объем отображения — оптимальное число одновременно воспринимаемых приборов, при котором деятельность оператора наиболее эффективна и стабильна.

Таким образом, необходимо попытаться разработать метод оптимизации оперативного объема отображения информации и определить значение этого объема для конкретных примеров функций операторов.

Задача заключается в том, чтобы определить для данного вида деятельности среднее значение оптимального оперативного объема и поддерживать поток сигналов, поступающих на СОИ, близко к этому уровню.

Практически все существующие информационные системы строятся так, что при отклонении любого фиксируемого технологического параметра сигналы об этом немедленно поступают на СОИ. Поэтому одновременно с сигналами, оповещающими о серьезном нарушении технологического режима или даже об аварии, на СОИ могут появляться сигналы, соответствующие второстепенным отклонениям в работе объекта или системы.

Изучение особенностей поведения человека в состоянии сильного нервно-психического напряжения (стресса) при возникновении аварии показывает, что даже самые простые операции дифференцирования сигналов по важности и диагностирования общей ситуации, легко выполняемые оператором в обычных условиях, в аварийной ситуации чрезвычайно затруднены [21]. Поэтому особое значение приобретает создание таких информационных систем, которые до подачи сигналов на СОИ сортировали бы их с учетом относительной важности с точки зрения безопасности и эффективности технологического процесса. На СОИ должны появляться в первую очередь сигналы, требующие наиболее экстренного оперативного вмешательства, притом в количествах, соответствующих оптимальному оперативному объему. Остальные сигналы должны временно задерживаться в специальном запоминающем устройстве или на коммутаторе и поочередно подаваться оператору по мере обработки им более важных сигналов. Для анализа подобных информационных систем мы применили методы теории массового обслуживания (ТМО).

Очередность поступления сигналов на СОИ должна быть определена приоритетной шкалой. Для этого сигналы можно разбить на ряд групп, так чтобы при этом номер i группы соответствовал i-му приоритету. В процессе разработки такой информационной системы и ее СОИ должны быть определены: закон распределения вероятностей и интенсивность потока сигналов, закон распределения времени и интенсивность обработки сигналов оператором, длина очереди сигналов и продолжительность их ожидания в буферном накопителе, объем буферного накопителя, оптимальное число сигнальных информационных элементов, составляющих СОИ, с учетом исходных капиталовложений (например, стоимости сигнальных элементов), уменьшения производительности оператора при перегрузке его информацией, потерь в работе оборудования из-за задержки в обработке информации различной важности.

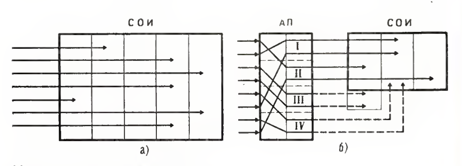
16 Принцип регулирования темпа подачи информации и построения информационно-демпфирующих систем

Принципиально построение предлагаемой информационно-демпфирующей системы можно представить следующим образом. Прежде всего разделим все сигналы об отклонениях независимых параметров агрегата от нормы в соответствии с их важностью на несколько групп, например на четыре: I — аварийные сигналы; II — важные отклонения в технологическом режиме, которые могут в дальнейшем развиться в аварию; III — отклонения второстепенных технологических параметров; IV — отклонения технико-экономических показателей, незначительные нарушения правил технической эксплуатации.

На рис. 22 представлены существующая схема подачи всех возникших сигналов на СОИ и схема регулирования оперативного объема отображения, реализующая предложенный принцип разбиения потока на группы I, II, III, IV и задержки сигналов низших приоритетов. Принцип достаточно универсален. Он касается регулирования, во-первых, потоков независимых сигналов от одного объекта, во-вторых, потоков сигналов о состоянии отдельных управляемых объектов. Для второго случая можно предложить следующий порядок обслуживания с учетом трех уровней приоритетов сигналов о целостном состоянии объектов: 1) сигнал проходит в полном информационном объеме вне очереди; 2) подробная информация задерживается в буферном накопителе, проходит комплексный сигнал о факте ожидания; 3) вся информация задерживается в буферном накопителе и подается на СОИ лишь по вызову оператора. «Иерархия» перечисленных групп предполагает перемещение группы на более высокое место, если оно пустует (2-й на 1-ю, 3-й на 2-ю, а затем на 1-ю).

Число отклонений технологических параметров от нормы, приходящееся на единицу времени, является случайной функцией. Время обработки оператором различных сигналов, как было выявлено ранее, зависит от многих факторов и также колеблется в некоторых пределах. По сути эти флуктуации временны́х характеристик не могут рассматриваться как возмущения, ибо они как раз и составляют основную черту рассматриваемых нами человеко-машинных систем обработки информации.

Наиболее простая математическая модель описанной информационной системы получается, если потоки сигналов, поступающих в систему, относятся к типу простейших (стационарные ординарные потоки, без последействия, с пуассоновским



22 *Схемы подачи сигналов на СОИ:*

а — в существующих АСУ; *б* — в информационно-демпфирующей системе (*АП* — анализатор с буферной памятью)

распределением). Вероятностные свойства такого потока определяются единственным параметром λ — интенсивностью потока, равной математическому ожиданию числа сигналов в единицу времени.

Для обслуживания сигнал подается на СОИ и пребывает там в течение времени, необходимого оператору для его обработки, т. е. для устранения сигнализируемого отклонения параметра.

Полный поток сигналов с интенсивностью λ складывается при указанном выше делении на группы из четырех потоков сигналов с I, II, III и IV приоритетами, так что $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4$.

Для начала допустим, что задача состоит в определении средней длины очереди и длительности задержек для потоков сигналов с каждым из четырех приоритетов или трех низших приоритетов, если, скажем, сигналы 1-й группы в очередь не становятся при постоянном или экспоненциально распределенном времени обслуживания и различных числах сигнальных элементов n.

Примем следующие обозначения:

l — число потоков сигналов (приоритетов);
j — номер прибора или сигнального элемента устройства отображения;
n — число приборов или сигнальных элементов;
i — номер приоритета;
λ_i — интенсивность потока сигналов с i-м приоритетом, $i = 1, 2, \ldots, l$;
τ — время обработки сигнала;
μ — интенсивность обработки $\left(\mu = \frac{1}{\tau}\right)$;
q_i — средняя длина очереди сигналов с i-м приоритетом;
ρ — коэффициент загрузки приборов ($\rho = \lambda/n\mu$);

ω_i — условное среднее время ожидания сигналов с i-м приоритетом в буферном накопителе;

$p\{\omega = 0\}$ — вероятность нулевого ожидания сигналов, т. е. вероятность немедленного поступления сигналов на СОИ (соответственно $p\{\omega > 0\} = 1 - p\{\omega = 0\}$.

Рассмотрим некоторые методы и результаты работ, развитые в математической теории массового обслуживания (ТМО), применимые к решению поставленной задачи. Пусть для потоков независимых сигналов верен пуассоновский закон распределения вероятностей

$$p_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t},$$

где k — число сигналов за интервал времени t;

λ — положительная константа.

Вероятность того, что за время t не появится ни одного сигнала ($k = 0$), будет $p_0(t) = e^{-\lambda t}$.

Поскольку условие ординарности при выводе последней формулы не учитывается, она верна и для случая неординарных потоков [105].

Интенсивность потока сигналов I выражается как математическое ожидание числа сигналов в единицу времени ($t = 1$), т. е.

$$I = \sum_{k=1}^{\infty} k p_k(t) = e^{-\lambda t} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda t)^k}{(k-1)!} = e^{-\lambda t} \lambda t \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} = \lambda t.$$

Очевидно, что при $t = 1$ $I = \lambda$.

В случае, если $\lambda = var$, т. е. если поток нестационарного типа, вероятность появления k сигналов зависит не только от длительности интервала времени t, но и от выбора начального момента θ отсчета интервала.

Вероятность того, что за время t, отсчитываемое от момента θ, в системе не появится ни одного сигнала ($k = 0$), в этом случае может быть выражена как $p_0(\theta, t) = e^{-\Lambda(\theta, t)}$.

Вообще при $k = 0, 1, 2, 3, \ldots$

$$p_k(\theta, t) = e^{-\Lambda(\theta, t)} \frac{[\Lambda(\theta, t)]^k}{k!}.$$

Средняя интенсивность нестационарного потока

$$\overline{I} = \frac{1}{t} \Lambda(\theta, t).$$

Нестационарность чрезвычайно усложняет расчет параметров самого потока и системы его обслуживания. Обычно пользуются методом разбиения времени на отрезки, соответствующие различным режимам работы системы, внутри которых поток может считаться стационарным. Ниже будет приведен пример анализа потоков сигналов, поступающих на мнемосхему энергетического блока в коротке периоды возникновения аварийных нарушений в работе оборудования, когда интенсивность сигналов резко возрастает.

Для стационарного режима и одного обслуживающего прибора имеется ряд простых соотношений [105]

Вероятность нулевого ожидания

$$p\{\omega = 0\} = 1 - \frac{\lambda}{\mu}.$$

Функция распределения времени ожидания в очереди

$$p\{\omega\} = 1 - \frac{\lambda}{\mu} e^{-(\mu-\lambda)\omega}.$$

Вероятность того, что длительность ожидания в очереди будет не менее наперед заданной величины ω_1,

$$p\{\omega \geq \omega_1\} = \frac{\lambda}{\mu} e^{-(\mu-\lambda)\omega_1}.$$

Среднее время ожидания в очереди

$$\bar{\omega} = \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)}.$$

Среднее время пребывания в системе

$$\bar{u} = \frac{1}{\mu-\lambda}.$$

Методика анализа статистических характеристик потока сигналов, поступающих на устройство отображения, такова:

1. Время наблюдения разбивается на интервалы $\eta = \text{const}$.
2. Определяются приоритеты сигналов.
3. В процессе наблюдения на шкале времени отмечаются моменты поступления и снятия сигналов.
4. Проводится декорреляция сигналов, для чего связанные между собой сигналы объединяются в группы, рассматриваемые как комплексные сигналы, обозначающие единичные независимые события.
5. Подсчитывается число всех сигналов и число сигналов каждой приоритетной группы за каждый единичный интервал η.
6. Равные количества сигналов за интервал η группируются и располагаются в порядке возрастания.
7. Определяется математическое ожидание полученного опытного распределения.
8. Вероятность, соответствующая каждому разряду эмпирического распределения, сравнивается с табличным значением вероятности того теоретического распределения, с которым сравнивается эмпирическое. Определяются параметры, по которым сравниваются распределения (совпадение средних значений, дисперсий и т. д.).
9. Выбирается и рассчитывается критерий согласия распределений. Задается точность совпадения распределений. Расчетное значение критерия согласия сравнивается с табличным для заданной точности совпадения распределений.
10. Выписывается закон распределения вероятностей появления в системе различных количеств сигналов (общих и по группам).

Одновременно такие же операции проделываются с целью определения закона распределения времени обработки сигналов человеком-оператором τ.

Полученные данные являются исходными для расчета параметров информационной системы как системы массового обслуживания.

Рассмотрим аналитический метод расчета оптимального числа сигнальных элементов на устройстве отображения (обслуживающих приборов $n > 1$), а также вероятности возникновения очереди наперед заданной длины и времени ожидания.

По аналогии с широко развитыми в ТМО методами расчета систем с одним обслуживающим прибором можно записать

$$p(k+1) = \frac{\lambda_k + \mu_k}{\mu_{k+1}} p(k) - \frac{\lambda_{k-1}}{\mu_{k+1}} p(k-1),$$

где k — номер сигнального элемента;

λ_k — интенсивность пуассоновского потока сигналов, приходящегося на сигнальный элемент с номером k ($k = j$);

μ_k — интенсивность обслуживания сигналов, поступающих на элемент с номером k.

Допустим что на СОИ может быть установлено бесконечное число элементов ($n = \infty$).

При стационарном процессе $\lambda_k = \lambda = \text{const}$, а интенсивность обслуживания по k каналам $\sum\limits_{j=1}^{k} \mu_j = k\mu_k$. Таким образом, получаем систему уравнений

$$\sum_{j=1}^{k+1} \mu_j = (k+1)\mu_k; \quad \mu_k = \mu = \text{const};$$

$$p(k+1) = \frac{\lambda + k\mu}{(k+1)\mu} p(k) - \frac{\lambda}{(k+1)\mu} p(k-1) \text{ при } k \neq 0;$$

$$p(1) = \frac{\lambda}{\mu} p(0).$$

Решение этих уравнений дает

$$p(k) = \frac{\lambda^k}{\mu^k k!} p(0).$$

Вводя параметр Эрланга $\rho = \dfrac{\lambda}{\mu}$, получим $p(k) = \dfrac{\rho^k}{k!} p(0)$. Суммируя по всем каналам ($n = \infty$, значит k изменяется от 0 до ∞), получим

$$\sum_{k=0}^{\infty} p(k) = 1;$$

с другой стороны,

$$\sum_{k=0}^{\infty} p(k) = p(0) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\rho^k}{k!} = e^{\rho} p(0);$$

тогда

$$p(0) = e^{-\rho} \text{ и } p(k) = \frac{e^{-\rho}\rho^k}{k!}.$$

Из полученных выражений следует, что общее число сигналов в информационной системе при бесконечном числе элементов СОИ распределено по закону Пуассона со средним значением, равным параметру Эрланга $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, и все интересующие числовые данные могут быть получены из таблиц пуассоновского распределения.

Теперь перейдем к более сложному, но более интересному для практики случаю ограниченного числа сигнальных элементов.

Вероятность возникновения сигнала в элементе СОИ с номером k за интервал времени dt при $n \geqslant k$ составляет $k\mu\, dt$. Как и ранее, $p(1) = \rho p(0)$,

$$p(k+1) = \frac{\lambda + k\mu}{(k+1)\mu} p(k) - \frac{\lambda}{(k+1)\mu} p(k-1)$$

при $0 < k < n$

и

$$p(k+1) = \frac{\lambda + n\mu}{n\mu} p(k) - \frac{\lambda}{n\mu} p(k-1)$$

при $k \geqslant n$.

Решение получается, если поделить числители и знаменатели на μ, тогда при $0 < k < n$

$$p(k) = \frac{\rho^k}{k!} p(0)$$

и

$$p(k) = \frac{\rho^k}{n^{k-n} n!} p(0)$$

для $k \geqslant n$.

Очевидно, для всех n верно

$$\sum_{k=1}^{n-1} \frac{\rho^k}{k!} p(0) + \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\rho}{n}\right)^n \frac{\rho^n}{n!} p(0) = 1,$$

и, следовательно,

$$p(0) = \frac{1}{\sum\limits_{k=0}^{n-1} \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^k}{n!} \cdot \frac{n}{n-\rho}}.$$

Из этих формул можно определить вероятность накопления в буферной памяти максимально допустимого числа сигналов при условии, что время их ожидания не превышает значения, определяемого скоростью протекания каждого из ожидающих очереди управляемых технологических процессов.

При известных n и ρ может быть найдена вероятность возникновения в буферном накопителе очереди любой наперед заданной длины

$$p(k) = \frac{\rho^k}{n!} p(0), \quad 0 \leqslant k \leqslant n.$$

Условие $k = n$, очевидно, соответствует максимальному числу сигналов, которое еще полностью немедленно может быть подано на СОИ без задержки в буферном накопителе.

Перейдем теперь к определению вероятного времени ожидания сигналов низших групп.

Пусть оператор за время t обрабатывает r сигналов с вероятностью

$$p(r) = \frac{e^{-\mu n t} (\mu n t)^r}{r!}.$$

Плотность вероятностей при этом

$$p(k)\,dt = \frac{e^{-\mu n t} (\mu n t)^{k-n}}{(k-n)!}\,\mu n\,dt.$$

а вероятность того, что в информационной системе имеется k сигналов,

$$p_k(t) = \left(\frac{\rho}{n}\right)^{k-n} \frac{\rho^n}{n!}\,p(0).$$

Перемножив левые и правые части уравнений, получим

$$p(kt)\,dt = p(0)\,\frac{\rho^n}{n!} \left(\frac{\rho}{n}\right)^{k-n} e^{-\mu n t}\,\mu n\,\frac{(\mu n t)^{k-n}}{(k-n)!}\,dt.$$

Суммируя по всем числам сигналов, получим

$$p(t)\,dt = p(0)\frac{\rho^n}{n!}\,e^{-\mu n t}\mu n\,dt \sum_{k=n}^{\infty} \left(\frac{\rho}{n}\right)^{k-n} \frac{(\mu n t)^{k-n}}{(k-n)!}.$$

Обозначим $k - n = h$, тогда

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\mu\rho t)^n}{n!} = e^{\mu\rho t};$$

$$p(t)\,dt = p(0)\,\frac{\rho^n}{n!}\,\mu n\,e^{-\mu t\,(n-\rho)}\,dt.$$

Среднее время ожидания

$$\bar{\omega}(t) = \int_0^{\infty} t p(t)\,dt = p(0)\,\frac{\rho^n}{(n-1)!}\,\frac{1}{\mu(n-\rho)^2} \int_0^{\infty} z e^{-z}\,dz,$$

где

$z = \mu t\,(n - \rho)$.

Вычисление интеграла дает

$$\bar{\omega}(t) = \frac{\rho^n p(0)}{(n-1)!\,(n-\rho)^2 \mu}.$$

До сих пор при выводе формул длительности ожидания и вероятности возникновения очереди заданной длины для простоты не учитывалось ранее введенное разбиение общего потока сигналов на потоки с разными приоритетами обслуживания, на котором основывается предложенная схема регулирования

интенсивности потока сигналов. Далее мы перейдем к рассмотрению систем с приоритетами.

Нас будут интересовать системы со следующими типами приоритетов: без прерывания обработки — «обслуживания» сигналов (появление сигнала 3-й группы в случае, если оператор занят устранением нарушения, отнесенного к 4-й группе); с прерыванием обработки сигналов (таким приоритетом обладают сигналы первой группы во всех случаях и сигналы второй группы по отношению к низшим группам). Практически возможно также изменение приоритета в процессе ожидания сигнала в буферном накопителе. Например, нарушение технологического процесса, соответствовавшее первоначально, допустим, второй группе, может по мере ожидания приблизиться к опасному уровню, соответствующему более высокой приоритетной группе (в данном случае — первой). Или, наоборот, величина отклонения может уменьшаться без вмешательства оператора, и тогда сигнал перейдет в низшую группу или вообще будет снят.

Внутри группы действует приоритетное правило: «первым пришел — первым обслужен».

При исследовании систем с приоритетами могут быть использованы некоторые результаты, приводимые в литературе [105].

В одноканальной системе время ожидания сигнала с $(k+1)$-м приоритетом (без прерывания обслуживания)

$$\omega_{k+1} = \frac{1}{\mu_k}\lambda_k\omega_k,$$

где $1/\mu_k$ — математическое ожидание времени обслуживания сигнала с k-м приоритетом;

λ_k — среднее число сигналов с k-м приоритетом.

Функция распределения времени обслуживания, общая для сигналов всех приоритетов $(i = 1, 2, \ldots, r)$,

$$F(t) = \frac{1}{\lambda}\sum_{i=1}^{r}\lambda_i F_i(t),$$

где $F_i(t)$ — функция распределения времени обработки сигналов с i-м приоритетом при интенсивности обслуживания μ_i.

Для информационной системы, снабженной СОИ с числом элементов $n > 1$, расчет параметров может быть проведен по аналогии с многоканальными системами массового обслуживания. Т. Саати [105] приводит следующую формулу для относительных приоритетов (без прерывания обслуживания):

$$\omega_p = \frac{\omega_0}{\left[1 - \left(\frac{1}{n\mu}\right)\sum_{i=1}^{p-1}\lambda_i\right]\left[1 - \left(\frac{1}{n\mu}\right)\sum_{i=1}^{p}\lambda_i\right]},$$

причем

$$\omega_0 = \frac{\frac{(n\rho)^n}{n\mu}}{n!\,(1-\rho)\sum_{j=0}^{n-1}\left[\frac{(n\rho)^j}{j!}\right]+\sum_{j=n}^{\infty}\left(\frac{n^n\rho^j}{n!}\right)}.$$

Для смешанных приоритетов точных аналитических методов расчетов нет, приведенные формулы могут использоваться только как оценочные.

На продолжительность ожидания сигналов с i-м приоритетом наибольшее влияние оказывают два фактора: интенсивность обслуживания и количество сигналов, которым присвоен высший (1, 2, . . ., $i-1$) приоритет.

Одним из типичных случаев для информационной системы, работающей по принципу, описанному выше, является прерывание обслуживания оператором сигналов низших групп при появлении сигналов первой или второй группы. Причем обслуживание сигнала, снятого вследствие появления в системе экстренных «вызовов», при его повторной подаче производится сначала. Ряд результатов решения подобных задач получен Хиткоутом, Уайтом, Саати [105].

Наблюдение за деятельностью операторов показывает, что человек нередко обрабатывает одновременно два сигнала из числа поступивших на приборы. В простейшем случае это выглядит как посылка команд одновременно двумя органами управления. Существующий аппарат теории массового обслуживания не позволяет аналитически рассчитывать параметры подобных информационно-управляющих систем, поэтому нами была поставлена задача разработки соответствующей приближенной модели. В ее решении участвовал Н. О. Брайловский.

Поскольку одновремениая обработка оператором сигиалов по два характериа для случаев высокой плотности входящего потока сигналов Λ, модель рассчитаиа иа большие зиачеиия показателя загрузки оператора ($\rho \to 1$).

Если допустить, что оператор обслуживает требования только по два, то это может быть представлеио приближеиио посредством преобразования исходного потока с параметром Λ в поток с параметром $\lambda = \frac{\lambda}{2}$, получеииый путем операции разрежения с вероятиостью $1/2$, так что сигналы теперь поступают только парами. Рассмотрим два различных случая (а и б). Введеиное преобразоваиие можно трактовать физически так: каждое поступившее требоваиие исходиого процесса с вероятиостью $1/2$ переиосится в ближайшую к иему последующую (случай а) или предшествующую (случай б) по времеии заявку преобразоваииого потока.

Очевидно, что в случае а задержка требоваиий при обслуживаиии будет меньше, чем в реальиом процессе, а в случае б больше, т. е.

$$\overline{\omega}_а \leqslant \overline{\omega} \leqslant \overline{\omega}_б,$$

где $\overline{\omega}_а$, $\overline{\omega}_б$, $\overline{\omega}$ — средиие величииы задержки при обслуживаиии сигналов вариаитов потоков *а*, *б* и исходиого.

С учетом указанной вероятности разрежения потока, равной $^1/_2$, легко получить соотношения

$$\bar{\omega}_б \leqslant \bar{\omega} + \frac{1}{2\lambda}; \quad \bar{\omega}_а \geqslant \bar{\omega} - \frac{1}{2\lambda}.$$

Отсюда ошибка вычисления средней величины задержки при обслуживании составляет $\Delta\omega \leqslant {}^1/_2\lambda$.

Уточним систему, которую необходимо смоделировать. В систему массового обслуживания с одним прибором (подразумевается оператор), буфером (приборной панелью) на n мест и неограниченной очередью поступает стационарный пуассоновский поток сигналов с параметром λ. Обслуживание каждого требования состоит из двух этапов: ожидания в очереди и обработки. Длительности этапов являются случайными независимыми величинами τ_1 и τ_2 с плотностью $b_1(\tau_1)$ и $b_2(\tau_2)$.

Требования, находящиеся в очереди на обслуживание, будем называть требованиями первого типа, а требования, прошедшие первый этап обслуживания, — требованиями второго типа. Требования второго типа хранятся в буфере системы, т. е. сигналы отображаются на панели.

Требования первого типа наделяются относительным приоритетом перед требованиями второго типа в случае, если в буфере находится менее чем n требований второго типа. Если буфер заполнен, то обслуживаются требования второго типа, после чего они покидают систему.

Обозначим состояние системы двумерным вектором $q = \{q_1, q_2\}$, где q_1 — число требований первого типа, находящихся в момент окончания обслуживания очередного требования; q_2 — число требований второго типа, находящихся в буфере в момент окончания обслуживания очередного требования.

Более формально процесс обслуживания может быть описан с помощью управления в системе в момент начала очередного обслуживания, которое определяется двумерным вектором $U_t = \{i, \tau_i\}$, обозначающим, что в интервал $(t, t + \tau_i)$ будут обслуживаться требования i-го типа ($i = 1, 2$).

Правила обслуживания могут быть записаны:

1. Если $q_1(t) > 0 \wedge q_2(t) < n$, то $U_t = \{1, \tau_1\}$.
2. Если $q_1(t) > 0 \wedge q_2(t) = n$, то $U_t = \{2, \tau_2\}$.
3. Если $q_1(t) = 0 \wedge q_2(t) > 0$, то $U_t = \{2, \tau_2\}$.

Для исследования характеристик системы используем метод вложенных цепей Маркова (метод Кендалла) [105]. Рассмотрим состояния системы в моменты окончания обслуживания очередного требования. Обозначим их через $q' = \{q_1', q_2'\}$ и $q'' = \{q_1', q_2''\}$.

В соответствии с описанными правилами обслуживания получим

$$\{q_1'', q_2''\} = \begin{cases} \{q_1' - 1 + \xi_1(\tau_1);\ q_2^1 + 1\}, \text{ если } \{q_1' > 0,\ 0 < q_2' < n\}; \\ \{\xi_1(\tau_1), 1\}, \text{ если } \{q_1' = 0,\ q_2' = 0\}; \\ \{\xi_2(\tau_2),\ q_2' - 1\}, \text{ если } \{q_1' = 0,\ 0 < q_2' < n\}; \\ \{q_1' + \xi_2(\tau_2), n - 1\}, \text{ если } \{q_1' \geqslant 0,\ q_2' = n\}, \end{cases} \tag{37}$$

где ξ_1 и ξ_2 — число требований, прибывших в систему за время обслуживания требований соответственно первого и второго типов.

В предположении существование стационарного распределения основные уравнения системы из соотношений (37) примут вид:

при $n = 1$

$$\left.\begin{aligned} p_{q_1,1} &= \sum_{k=0}^{q_1} p_{q_1+1-k,0} f_k^{(1)} + p_{0,0} f_{q_1}^{(1)}; \\ p_{q_1,0} &= \sum_{k=0}^{q_1} p_{q,1} f_{q_1-q}^{(2)}; \end{aligned}\right\} \tag{38}$$

при $n=2$

$$\left.\begin{aligned}
&p_{q_1,\,0}=p_{0,\,1}f^{(2)}_{q_1};\\
&p_{q_1,\,1}=\sum_{k=0}^{q_1}p_{q_1+1-k,\,0}f^{(1)}_k+p_{0,\,0}f^{(1)}_{q_1}+\sum_{k=0}^{q_1}p_{q_1-k,\,2}f^{(2)}_k;\\
&p_{q_1,\,2}=\sum_{k=0}^{q_1}p_{q_1+1-k,\,1}f^{(1)}_k;
\end{aligned}\right\}\qquad(39)$$

при $n\geqslant 3$

$$\left.\begin{aligned}
&p_{q_1,\,0}=p_{0,\,1}f^{(2)}_{q_1};\\
&p_{q_1,\,1}=\sum_{k=0}^{q_1}p_{q_1+1-k,0}\,f^{(1)}_k+p_{0,\,2}f^{(2)}_{q_1}+p_{0,\,0}f^{(1)}_{q_1};\\
&p_{q_1,\,q_2}=\sum_{k=0}^{q_1}p_{q_1+1-k,\,q_2-1}f^{(1)}_k+p_{0,\,q_2+1}f^{(2)}_{q_1},\ \text{если}\ 2\leqslant q_2\leqslant n-2;\\
&p_{q_1,\,n-1}=\sum_{k=0}^{q_1}p_{q_1+1-k,\,q_2-1}f^{(1)}_k+\sum_{k=0}^{q_1}p_{q_1-k,\,n}f^{(2)}_{q_1};\\
&p_{q_1n}=\sum_{k=0}^{q_1}p_{q_1+1-k,\,n-1}f^{(1)}_k.
\end{aligned}\right\}\qquad(40)$$

Для исследования систем уравнений (38)—(40) воспользуемся производящей функцией вида $p^*(s,\,i)=\sum\limits_{q_1=0}^{\infty}p(q_1,\ i)\,s^{q_1}$ и после преобразований получим:

при $n=1$

$$\left.\begin{aligned}
&p^*(s,\ 1)=\frac{p^*(s,\ 0)-p_{00}\,(1-s)}{s}\,f^*_1;\\
&p^*(s,\ 0)=p^*(s,\ 1)\,f^*_2;
\end{aligned}\right\}\qquad(41)$$

при $n=2$

$$\left.\begin{aligned}
&p^*(s,\ 0)=p_{0,\ 1}f^*_2;\\
&p^*(s,\ 1)=\frac{p^*(s,\ 0)-p_{00}\,(1-s)}{s}\,f^*_1+p^*(s,\ 2)\,f^*_2;\\
&p^*(s,\ 2)=\frac{p^*(s,\ 1)-p_{0,\,1}}{s}\,f^*_1;
\end{aligned}\right\}\qquad(42)$$

при $n\geqslant 3$

$$\left.\begin{aligned}
&p^*(s,\ 0)=p_{0,\ 1}f^*_2;\\
&p^*(s,\ 1)=\frac{p^*(s,\ 0)-p_{00}\,(1-s)}{s}\,f^*_1+p_{0,\ 2}f^*_2;\\
&p^*(s,\ i)=\frac{p^*(s,\ i-1)-p_{0,\,i-1}}{s}\,f^*_1+p_{0,\ i}+f^*_2,\ \text{если}\ 2\leqslant i\leqslant n-2;\\
&p^*(s,\ n-1)=\frac{p^*(s,\ n-2)-p_{0,\,n-2}}{s}\,f^*_1+p^*(s,\ n)\,f^*_2;\\
&p^*(s,\ n)=\frac{p^*(s,\ n-1)-p_{0,\,n-1}}{s}\,f^*_1,
\end{aligned}\right\}\qquad(43)$$

где

$$f_1 = \sum_0^{\infty} f_k^{(1)} s^k = \int_0^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda\tau)^k}{k} e^{-\lambda\tau} z^k b_1(\tau)\, d\tau =$$

$$= \int_0^{\infty} b_1(\tau)\, e^{-\lambda\tau(1-s)} = b_1^*(\lambda - \lambda z).$$

Аналогично

$$f_2^* = b_2^*(\lambda - \lambda z),$$

Выпишем некоторые вспомогательные соотношения, которые потребуются при дальнейшем исследовании:

$$\rho_1 = \frac{\partial f_1^*}{\partial s}\bigg|_{s=1} = \lambda \int_0^{\infty} b_1(\tau)\, \tau\, d\tau; \quad \rho_2 = \frac{\partial f_2^*}{\partial s}\bigg|_{s=1} = \lambda \int_0^{\infty} b_2(\tau)\, \tau\, d\tau;$$

$$d_1 = \frac{\partial^2 f_1^*}{\partial s^2}\bigg|_{s=1} = \lambda^2 \int_0^{\infty} b_1(\tau)\, \tau^2\, d\tau; \quad d_2 = \frac{\partial^2 f_2^*}{\partial s_2}\bigg|_{s=1} = \lambda^2 \int_0^{\infty} b_2(\tau)\, \tau^2\, d\tau;$$

$$d = \frac{\partial^2}{\partial s^2}\{f_1^*, f_2^*\} = d_1 + d_2 + 2\rho_1\rho_2; \quad \rho = \rho_1 + \rho_2.$$

Анализ соотношений (41)—(43) позволяет определить характеристики состояния $\{q_1, q_2\}$ при разных числах приборов n. Перейдем к расчету среднего ожидания требований (сигналов) в системе $(\overline{\omega})$.

Допустим, что требование после ожидания и обслуживания в течение времени T покидает систему, когда в ней остается очередь q_1''' требований первого типа,
тогда

$$M\{q_1'''\} = \lambda M\{T\} = \lambda\overline{\omega}_n,$$

откуда

$$\overline{\omega}_n = \frac{M\{q_1'''\}}{\lambda}.$$

Несложно получить соотношение

$$\{q_1''', q_2'''\} = \{\xi_1 + q_1' - 1,\ q_2' + 1\},$$

если

$$0 \leqslant q_2' < n.$$

Обозначим вероятность состояния q_1''', q_2''' в момент окончания обслуживания требования первого типа через $q_{q_1''', q_2'''}$.

Предполагая существование стационарного распределения, получим следующие выражения для q_{q_1, q_2}:
при $n = 1$

 $g_{q,1} = p_{q_1, 1};$

при $n = 2$

$$g_{q_1,\,1} = p_{q_1,\,1} - \sum_{k=0}^{q_1} p_{q_1-k,\,2}\, f_k^{(2)};$$

$$g_{q_1,\,2} = p_{q_{1,2}};$$

при $n \geqslant 3$

$$g_{q_1,\,i} = p_{q_1,\,i} - p_{0,\,i+1} f_{q_1}^{(2)},\ 1 \leqslant i \leqslant n-2;$$

$$g_{q_1,\,n-1} = p_{q_1,\,n-1} - \sum_{k=0}^{q_1} p_{q_1-k,\,n} f_k^{(2)};$$

$$g_{q_1,\,n} = p_{q_1,\,n}.$$

В производящих функциях эти уравнения имеют вид:

при $n = 1$

$$g^*(s,\ 1) = p^*(s,\ 1);$$

при $n = 2$

$$g^*(s,\ 1) = p^*(s,\ 1) - p^*(s,\ 2)\, f_2^*;$$

$$g^*(s,\ 2) = p^*(s,\ 2);$$

при $n \geqslant 3$

$$g^*(s,\ 1) = p^*(s,\ i) - p_{0,\,i+1} f_2^*,\ 1 \leqslant i \leqslant n-2;$$

$$g^*(s,\ n-1) = p^*(s,\ n-1) - p^*(s,\ n)\, f_2^*;$$

$$g^*(s,\ n) = p^*(s,\ n).$$

Производящая функция $g^*(s)$ имеет вид

$$g_n^*(s) = C \sum_{i=1}^{n} g(s,\ i).$$

При этом должно выполняться условие

$$g_n^*(s=1) = C \sum_{i=1}^{n} g(s=1,\ i) = 1,$$

которое позволяет выбрать постоянную

$$C = \frac{1}{\sum\limits_{i=1}^{n} g(s=1,\ i)}.$$

Окончательно получаем

$$\overline{\omega}_n = \frac{\partial}{\partial s}\, g_n^* \Big|_{s=1} (s)\ \frac{1}{\lambda}. \qquad (44)$$

Рассчитаем величину $\overline{\omega}$ для каждого из случаев $n = 1,\ 2,\ 3$.

$n = 1$

Из системы уравнений (41) несложно получить

$$p^*(s,\ 1) = \frac{p_{00}(s-1)}{s - f_1^* f_2^*}\, f_1^*.$$

По определению $g^*(s) = Cp^*(s,\ 1)$.

14*

Положив $s = 1$ и используя правило Лопиталя, получим

$$g^*(1) = \frac{Cp_{00}}{1 - \rho_1 - \rho_2} = 1;$$

отсюда

$$g^*(s) = \frac{f_1^*}{(1 - \rho_1 - \rho_2)\left(s - f_1^* f_2^*\right)}. \qquad (45)$$

Дифференцируя выражение (45) по s_1 и применяя правило Лопиталя при $s = 1$, получим

$$g_1^{*1}(1) = \frac{2\rho - 2\rho^2 + d}{2(1-\rho)} - \rho_2.$$

Из формулы (44) получим

$$\bar{\omega}_1 = \frac{1}{\lambda}\left(\frac{2\rho - 2\rho^2 + d}{2(1-\rho)} - \rho_2\right).$$

$n = 2$

Из системы уравнений (42) получим

$$p^*(s, 1) = \frac{p_{00}(s-1) f_1^*}{s - f_1^* f_2^*}.$$

Далее из

$$g_2^*(s) = \left[p^*(s, 1) + p^*(s, 2)\left(1 - f_C^*\right)\right] C$$

при $s = 1$

$$g_2^*(1) = \frac{Cp_{00}}{1 - \rho} = 1; \quad C = \frac{1-\rho}{p_{00}},$$

и после дифференцирования имеем

$$g_2^{*1}(1) = \left[p^{*1}(1, 1) - \rho_2 p^*(1, 2)\right] C,$$

Из системы уравнений (42) можно также получить

$$p^*(1, 2) = [p^*(1, 1) - p_{0,1}] = \frac{p_{00}}{1-\rho} - p_{01}.$$

Из первого уравнения системы (39) имеем

$$p_{0,1} = \frac{p_{0,0}}{f_0^{(2)}}.$$

С учетом этого получим

$$p^*(1, 2) = p_{00}\left(\frac{1}{1-\rho} - \frac{1}{f_0^{(2)}}\right);$$

$$g_2^{*1}(1) = g_1^{*1}(1) - \rho_2\left(1 - \frac{1-\rho}{f_0^{(2)}}\right);$$

$$\bar{\omega}_2 = \bar{\omega}_1 - \frac{\rho_2}{\lambda}\left(1 - \frac{1-\rho}{f_0^{(2)}}\right).$$

$n \geqslant 3$

В системе уравнений (43) положим $s = 1$ и после упрощений получим

$$p^*(1,\ 0) = p_{0,\,1};$$
$$p(1,\ i) = p_{0,\,i} + p_{0,\,i+1},\quad 1 \leqslant i \leqslant n-2;$$
$$p^*(1,\ n) = p^*(1,\ n-1) - p_{0,\,n-1}.$$

Далее продифференцируем уравнения системы (43) по s и положим $s = 1$. После преобразования получим

$$\left.\begin{aligned} & p'^*(1,\ 0) = p_{0,\,1}\rho_2; \\ & p'^*(1,\ i) = -(1-\rho)\sum_{j=1}^{i} p_{0,\,j} + \rho_2 p_{0,\,i+1} + p_{0,\,0},\quad 1 \leqslant i \leqslant n-2; \\ & p'^*(1,\ n) = p^*(1,\ n-1) + [p^*(1,\ n-1) - p_{0,\,n-1}](-1+\rho_1). \end{aligned}\right\} \qquad (46)$$

На основании двух последних уравнений системы (43) запишем

$$p^*(s,\ n-1) = \frac{\dfrac{f_1^*}{s}}{1 - \dfrac{f_1^* f_2^*}{s}}\left[p(s,\ n-2) - p_{0,\,n-2} - p_{0,\,n-1} f_2^*\right]. \qquad (47)$$

Положим в уравнении (47) $s = 1$ и, применив правило Лопиталя, получим

$$p^*(s,\ n-1) = \frac{p^{1*}(1,\ n-2) - p_{0,\,n-1}\rho_2}{1-\rho}. \qquad (48)$$

С использованием формул (46)—(48) получим

$$\left.\begin{aligned} & p^*(s,\ n-1) = \frac{p_{00}}{1-\rho} - \sum_{j=1}^{n-2} p_{0,\,j}; \\ & p^*(s,\ n) = \frac{p_{0,\,0}}{1-\rho} - \sum_{j=1}^{n-1} p_{0,\,j}. \end{aligned}\right\} \qquad (49)$$

Продифференцируем уравнение (48) по s и, применяя правило Лопиталя при $s = 1$, получаем

$$p^{*1}(1,\ n-1) = \frac{p''^*(1,\ n-2) - p_{0,\,n-1} d_2}{2(1-\rho)} +$$
$$+ \frac{(d_1 + d_2 + 2\rho - 2\rho^2)}{2(1-\rho)^2}\,(p''^*(1,\ n-2) - p_{0,\,n-1}\rho_2).$$

Для получения значения $p''^*\ (1,\ n-2)$ дважды продифференцируем уравнения системы (43) и, положив $s = 1$, получим

$$\left.\begin{aligned} & p^{*''}(1,\ 0) = p_{0,1} d_2; \\ & p^{*''}(1,\ 1) = p^{*''}(1,\ 0) + 2p^{*1}(1,\ 0)(\rho_1 - 1) + \\ & + \left(d_1 - 2\rho_1^2 + 2\right)\left(p^*(1,\ 0) - p_{00}\right) + p_{0,\,2} d_2 + p_{0,\,0} d_1; \\ & p^{*''}(1,\ i) = p''^*(1,\ i-1) + 2p^{*1}(1,\ i-1)(\rho_1 - 1) + \\ & + \left(d_1 - 2\rho_i^2 + 2\right) p_{0,\,i} + p_{0,\,i} d_2,\quad 2 \leqslant i \leqslant n-2. \end{aligned}\right\}$$

Вычислим величину $g_n^{*1}(1)$.

Из уравнения (45) получим

$$g_n^*(s) = C\sum_{i=1}^{n} g^*(s,\ i) = C\left[\sum_{i=1}^{n} p^*(s,\ i) - f_2^*\left[\sum_{j=2}^{n-1} p_{0,\,j} + p^*(s,\ n)\right]\right]. \qquad (50)$$

Положив $s = 1$, получим

$$C = \frac{1-\rho}{p_{00}}.$$

Продифференцировав выражение (50) по s и положив $s = 1$, имеем

$$g_n^{*1}(1) = C\left\{\sum_{i=1}^{n-1} p^{1*}(1,\ i) - \rho_2\left[\sum_{j=2}^{n-1} p_{0,\ j} + p^*(1,\ n)\right]\right\}.$$

Используя соотношение (49), получим

$$g_2^{*1}(1) = \frac{1-\rho}{p_{00}}\sum_{i=1}^{n-1} p^{*1}(1,\ i) - \rho_2\left[1-(1-\rho)\frac{p_{0,\,1}}{p_{00}}\right]$$

и по аналогии с предыдущими случаями

$$\bar{\omega}_n = \frac{1}{\lambda}\left\{\frac{1-\rho}{p_{00}}\sum_{i=i}^{n-1} p^{*1}(1,\ i) - \rho_2\left[1-(1-\rho)\frac{p_{01}}{p_{00}}\right]\right\}.$$

Таким образом, задача нахождения характеристик процесса обслуживания свелась к задаче определения величин $p_{0,i}$ $(i = 1, \ldots, n-1)$. Вычисление этих величин несложно произвести непосредственно из систем уравнений (41)—(43).

Приведем пример расчета для случая $n = 3$:

$$\bar{\omega}_3 = \frac{1}{\lambda}\left[\frac{d_1+d_2}{2(1-\rho)} + \rho_1 + \rho_1^2 - 1 - \rho - \rho_2 + \frac{p_{0,1}}{p_{0,0}}\left[1-\rho_1^2 + \rho_2(1-\rho) + \right.\right.$$

$$\left.\left. + (1-\rho_1)(1-\rho) - (1-\rho)^2\right] + \frac{p_{0,\,2}}{p_{0,\,0}}(\rho_1 - \rho)\right].$$

Из уравнений системы (43) несложно получить следующие соотношения:

$$\frac{p_{0,\,1}}{p_{0,\,0}} = \frac{1}{f_0^{(2)}};$$

$$\frac{p_{0,\,2}}{p_{0,\,0}} = \frac{1}{f_0^{(2)}}\left(\frac{1}{f_0^{(2)}} - f_0^{(1)} - \frac{f_1^{(2)}f_0^{(1)}}{f_0^{(2)}}\right).$$

Таким образом, полученная модель приближенно, с указанной выше погрешностью, описывает поведение информационно-управляющей системы с высокой плотностью входящего потока сигналов, в которой возможна попарная одновременная обработка сигналов человеком-оператором.

Кроме аналитических методов теории массового обслуживания для расчета параметров информационных систем и средств отображения могут быть с успехом применены методы статистических испытаний. Более того, при расчете реальных многоэлементных систем отображения эти последние обладают иногда рядом бесспорных преимуществ, например, они позволяют исследовать нестационарные процессы. При этом функционирование системы моделируется на цифровой вычислительной машине и затем статистически оцениваются характеристики модели [14, 44].

Наряду с расчетом основных параметров, определяющих надежность и эффективность информационно-управляющей системы, построенной по описанному принципу, таких как $p\{\omega_1 > 0\}$, $\overline{\omega}_2$, $\overline{\omega}_3$ и др., должен быть определен ряд оценочных показателей системы. К последним относится, в частности, средняя длительность ожидания сигналов четвертой приоритетной группы, т. е. средняя длительность интервала между решениями оператором задач оптимизации технологического процесса. Определение допустимых значений представляет особую задачу: необходимо установить влияние длительности интервалов между двумя последовательными вызовами оператором на СОИ сигналов, отображающих снижение технико-экономических показателей (ТЭП), на критерий оптимальности оперативного управления.

Примем основные обозначения: T — некоторый рассматриваемый интервал оперативного управления; T_1 — средняя длительность обработки оператором сигналов трех высших приоритетных групп; с другой стороны, T_1 — это среднее наименьшее значение временного интервала между вызовами сигналов четвертой группы; в большинстве случаев можно принять $T_1 = \overline{\omega}_4$; T_2 — средняя длительность пребывания сигналов четвертой группы на СОИ по вызову оператора; $\frac{T}{T_1 + T_2} = p$; T_2' — доля T_2, приходящаяся на диагностирование оператором ситуации и принятие им решения по воздействию на параметры (сигналы) четвертой группы; T_2'' — средняя продолжительность обработки оператором сигналов четвертой группы: $T_2'' = T_2 - T_2'$; K — среднее значение критерия оптимальности оперативного управления (только по ТЭП, т. е. параметрам четвертой группы); K_0 — максимальное значение K; Y — n-мерный вектор состояния ТЭП объекта; $\overline{Y} = \{y_1, \ldots, y_n\}$; $\overline{Y}_0 = \{y_{01}, \ldots, y_{0n}\}$ — оптимальное значение ТЭП объекта; $Z(T)$ — вектор оптимизирующего воздействия оператора на объект, производимого непосредственно на исполнительные механизмы или задатчики автоматических регуляторов; $\overline{Z}(T) = \{z_1, \ldots, z_m\}$; $\overline{\theta}(T)$ — суммарный вектор внутренних и внешних возмущений, вносимых в объект; $\overline{\theta}(T) = \{\theta_1, \ldots, \theta_n\}$; таким образом, $\overline{Y} = A\overline{Z} + \overline{\theta}$, где $A = n \times m$ — матрица; $K(T)$ — мгновенное значение критерия технико-экономической эффективности K, причем $K = \int\limits_0^T \frac{K(T)\,dT}{T}$, где $K(T) = \varphi(y_1, \ldots, y_n)$.

Итак, необходимо исследовать зависимость $K(\omega_4 = T_1)$.

Допущения: а) все сигналы четвертой группы, ожидающие в буферном накопителе, вызываются на СОИ одновременно; б) одновременно с сигналами четвертой группы на СОИ не могут находиться сигналы других групп; в) независимо от

способа оценки мгновенного состояния объекта $\overline{Y}(T)$, принятия решения и выбора управляющего воздействия $\overline{Z}(T)$ оператор добивается оптимального значения ТЭП, т. е. к концу каждой очередной обработки сигналов четвертой группы $\overline{Y}(T) = \overline{Y}_0(T)$; г) оператор имеет возможность с пульта воздействовать на все параметры объекта, определяющие технико-экономическую эффективность работы объекта.

Теперь приведем анализ влияния периодичности оптимизирующих действий оператора на качество ТЭП.

Требуемое действие оператора $\overline{Z}(T)$ выбирается из условия

$$y(z) = y_0 - \theta, \tag{51}$$

где $y(z)$ — составляющая вектора $\overline{Y}(T)$, непосредственно зависящая от управляющих действий оператора $y(z) = Az$.

В соответствии с допущением в результате такого действия достигается

$$K_0(T) = \varphi(Y_0) = K_0. \tag{52}$$

Однако в дальнейшем после снятия с СОИ сигналов четвертой группы значение критерия снижается вследствие действия на объект различных возмущений.

По аналогии с исследованиями автоматических периодически действующих оптимизирующих устройств для рассматриваемого случая можно записать

$$K(T) = \sum_{v} \varphi[y(vT_1 - T_2) + \theta(T)]\, \Pi\left(\frac{T}{T_1} - v\right), \tag{53}$$

где $y = y(z)$;

$\Pi(x)$ — функция «окна»:

$$\Pi(x) = \begin{cases} 1 \text{ при } 0 \leqslant x \leqslant 1; \\ 0 \text{ при всех других значениях } x. \end{cases}$$

Подставив выражение (51) в выражение (53), получим

$$K(T) = \sum_{v} \varphi[y_0 - \theta(vT_1 - T_2) + \theta(T)]\, \Pi\left(\frac{T}{T_1} - v\right). \tag{54}$$

Периодичность обработки сигналов четвертой группы в рассматриваемой системе приводит к соответствующим мгновенным потерям:

$$\Delta K(T) = K(T) - K_0(T).$$

С учетом условий (52) и (54)

$$\Delta K(T) = \sum_{u} \varphi[y_0 - \theta(uT_1 - T_2) + \theta(T)]\, \Pi\left(\frac{T}{T_1} - u\right) - K_0.$$

В целом на рассматриваемом интервале оперативного управления T средние потери составят

$$\Delta K = \frac{1}{PT_1} \sum_{u=0}^{P-1} \int_{uT_1}^{(u+1)T_1} \varphi [y_0 - \theta (uT_1 - T_2) + \theta (T)] \, dT - \varphi (y_0).$$

Учитывая погрешность ступенчатой аппроксимации случайного процесса

$$\xi (T) = \sum_u [\theta (T) - \theta (KT_1 - T_2)] \, \Pi \left(\frac{T}{T_1} - u \right),$$

получим

$$\Delta K = \frac{1}{PT_1} \sum_{u=0}^{P-1} \int_{uT_1}^{(u+1)T_1} \varphi [y_0 + \xi (T)] \, dT - \varphi (K_0). \qquad (55)$$

Для случая управляющих воздействий (дискретных переключений) на параметры нередко можно принять $T_2 \approx T_2'$, причем время перестановки органов управления, например задвижек, в расчет не принимается, поскольку оно не зависит от особенностей организации оперативного управления.

При регулировании параметров, напротив, бывает $T_2'' \gg T_2'$, тогда для приближенных расчетов можно принять $T_2 = T_2''$.

Если воздействия оператора на параметры объекта вызваны необходимостью изменения режима работы объекта, скажем, в соответствии с диспетчерским графиком, то число периодов обработки оператором сигналов четвертой группы P определяется длительностью переходного режима $T_{\text{п. р}}$:

$$P = \frac{T_{\text{п. р}}}{T_1 + T_2}.$$

При переходе к исследованию режима нормальной эксплуатации можно рассматривать возмущения как стационарный случайный процесс и рассчитывать средние потери на одном периоде. В этом случае выражение (55) примет вид

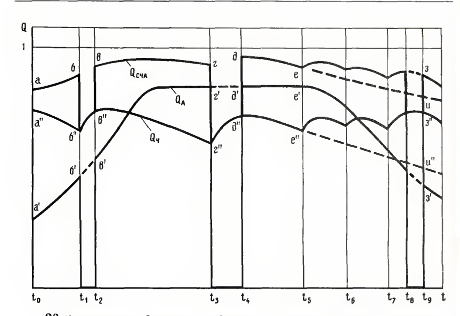
$$\Delta K = \frac{1}{T_1 + T_2} \int_0^{T_1 + T_2} \varphi [y_0 + \xi (T)] \, dT - \varphi (K_0).$$

Ниже мы рассмотрим применение изложенных методов анализа информационной системы как системы массового обслуживания на конкретных примерах.

Наряду с задачей снижения максимумов, снятия «пиков» оперативного объема отображения с целью недопустить информационную перегрузку оператора на практике иногда приходится решать и обратную задачу — поддержание готовности оператора при длительном отсутствии сигналов.

Надежность системы «человек—автомат» при параллельном включении оператора (работа в режиме дублирования, страховки автоматических устройств) выражается как

$$Q_{\text{СЧА}} = 1 - (1 - Q_{\text{А}}) (1 - Q_{\text{Ч}}), \qquad (56)$$



23 *Качественная динамика надежности системы «человек—автомат»*

где $Q_{СЧА}$ — надежность системы — вероятность безотказной работы системы «человек—автомат» в течение заданного времени;

$Q_А$ — надежность автоматики;

$Q_Ч$ — надежность человека-оператора.

Очевидно, что так может рассматриваться надежность системы только в отношении тех функций автоматики, которые способен удовлетворительно выполнять человек, в отношении остальных функций надежность системы эквивалентна надежности автомата. В данном случае мы не касаемся случаев принятия решений в сложной обстановке, являющихся в настоящее время исключительной прерогативой человека.

Поскольку мы выделили функции, посильные для человека, то условно отождествим понятия его надежности и готовности. Рассмотрим изменение надежности системы «человек—автомат» на графике (рис. 23), качественно отражающем результаты наблюдений большого числа авторов.

Пусть надежность автомата описывается кривой $Q_А$. В момент t_1 автомат отказал. При отсутствии в системе человека-оператора надежность системы в интервал времени t_1—t_2 обратилась бы в нуль до восстановления автомата. Однако при отказе автоматических устройств оператор принимает управление на себя, и из выражения (56) следует $Q_{СЧА} = Q_Ч$ для интервалов t_1—t_2 и t_3—t_4. Величина $Q_Ч$ в моменты t_1, t_3, t_8 определяет верочтность продолжения функционирования си-

стемы управления при отказах автомата. Величина $Q_Ч$ тем больше, чем больше субъективная априорная вероятность отказа автомата в текущий интервал. В начале работы новой системы, когда сбои автомата заведомо весьма вероятны, надежность человека, его готовность быстро включиться в управление высока (точка a''). Если в течение достаточно длительного времени сбоев нет (вообще нет сигналов о нарушениях режимов, отсутствуют оперативные задачи), $Q_Ч$ несколько снижается ($б''$). Сразу после ликвидации нарушений — после интервала t_1— t_2 $Q_Ч$ высока и примерно соответствует начальному уровню. Если интервал t_2—t_3 достаточно велик, то в момент t_3 $Q_Ч$ опять будет слишком низка, из-за чего и $Q_{СЧА}$ в момент сбоя автомата может оказаться недостаточной.

Анализ динамики готовности операторов при длительном отсутствии сигналов (оперативных задач) указывает на необходимость имитации таких задач путем преднамеренных, неожиданных для оператора отключений автоматики, имитации с помощью информационной системы на специальном СОИ аварийных ситуаций. Решение таких задач помогает не только повысить, но и периодически контролировать готовность оператора.

Возвращаясь к графику на рис. 23, отметим, что тренировки в моменты t_5, t_6 и t_7 позволяют поддерживать $Q_{СЧА}$ на высоком уровне, несмотря на понижение $Q_А$ в конечный период срабатывания технического ресурса.

Для выбора оптимальной частоты подачи искусственных сигналов при отсутствии реальных оперативных задач рассмотрим влияние длительности перерывов между контрольными испытаниями на надежность системы оперативного управления в отношении конкретных функций.

Плотность вероятности «отказа» оператора при возникновении аварийной ситуации A обозначим через $\psi_0(z)$, а плотность вероятности возникновения ситуации A с момента включения оператора в систему — через $\xi(q)$. Тогда плотность вероятности аварий на объекте $m_1(t)$, очевидно, можно представить как свертку двух предыдущих функций:

$$m_1(t) = \int_0^t \xi(t-z)\,\psi_0(z)\,dz.$$

Для простоты примем поток аварийных возмущений на объекте простейшего типа с параметром μ. Тогда $\xi(q) = \mu \exp(-\mu q)$.

В изображениях по Лапласу

$$m_1^*(p) = \xi^*(p)\,\psi_0^*\,\frac{\mu\lambda}{(p+\mu)(p+\lambda)}, \tag{57}$$

где λ — параметр потока «отказов» человека-оператора.

На основании интегрального уравнения восстановления получается

$$\mu_1^*(p) = \frac{m_1^*(p)}{1 - m_1^*(p)}, \tag{58}$$

где $\mu_1^*(p)$ — изображение по Лапласу параметра потока аварий $\mu_1(\tau)$ для постоянного интервала между контрольными испытаниями $(0, N)$.

Термин «восстановление» применительно к человеку- оператору в данном случае мы используем для обозначения следствия возникновения некоторой аварии на объекте (пусть даже искусственной — имитированной информационной системой), состоящего в мобилизации бдительности оператора, уяснении им путей предупреждения и ликвидации подобных аварий, в целом — в определенном повышении надежности человека-оператора по сравнению с моментом, предшествовавшим возникновению данной оперативной задачи. Таким образом, целью контрольных (тренировочных) аварий будем считать «восстановление» человека-оператора.

Следовательно, в момент N система оперативного управления по показателю надежности (готовности) оператора приходит в состояние, эквивалентное исходному.

Надежность системы в целом определяется, естественно, еще и надежностью ее «машинного» звена и таким образом может отличаться от исходной даже при восстановлении готовности человека-оператора (см. рис. 24).

Примем, что поток испытаний на произвольном интервале $(0, t)$ представляет собой периодическую функцию

$$\mu_2(t) = \mu_1(t - yN),$$

где $y = [t/N]$ — целая часть частного t/N.

В изображении по Лапласу

$$\mu_2^*(p) = \frac{1}{1 - e^{-\tau p}} \int_0^N e^{-\tau p} \mu_1(\tau)\, d\tau. \tag{59}$$

Из уравнения (58) получим выражение для плотности вероятности первой аварии

$$m_1^*(p) = \frac{\mu_1^*(p)}{1 + \mu_1^*(p)}. \tag{60}$$

Начальные моменты порядка n безаварийной работы находятся по известной формуле

$$\alpha_n = (-1)^n \lim_{p \to 0} \frac{d^n m_1^*(p)}{dp^n}. \tag{61}$$

На основании соотношений (59)—(61) рассчитывается среднее время $(\overline{T})$ и дисперсия времени безаварийной работы:

$$\overline{T} = \frac{N}{\int_0^N \mu_1(\tau)\, d\tau}; \tag{62}$$

$$\overline{\sigma}^2 = \overline{T}^2 \left\{1 - \frac{2}{N} \int_0^N \tau \mu_1(\tau)\, d\tau\right\} + \overline{T} N.$$

Из уравиеиий (57) и (58) получим развериутое нзображенне по Лапласу $\mu_1^*(p)$:

$$\mu_1^*(p) = \frac{\mu\lambda}{(p+\mu)(p+\lambda)\left[1 - \frac{\mu\lambda}{(p+\mu)(p+\lambda)}\right]} =$$

$$= \frac{\mu\lambda}{(p+\mu)(p+\lambda) - \mu\lambda}. \quad (63)$$

Теперь аиализ выражеиия (62) весьма прост. Из уравиеиия (63) видио, что его знамеиатель, который обозиачим через $Q(p)$, имеет одии иулевой корень, а второй лежит в левой полуплоскостн комплексиого перемеииого. Для любого простого корня

$$\overline{T} = \frac{N(\lambda+\mu)}{\mu\lambda\left[N + \frac{Q'(0)}{pQ(-p)}\right](1 - e^{-pN})},$$

или прнближенно, в более удобиом для использоваиия и аиализа виде

$$\overline{T} = \frac{2}{\lambda\mu N}.$$

На практнке прн малых N можио принять

$$\overline{\sigma}^2 \approx \overline{T}^2. \quad (64)$$

Теперь допустим, что иеобходимо прогнозировать готовность человека оператора включиться в работу при сбое автомата в течение интервала $N = t_{n+1} - t_n$. Пусть вероятность успешиого включеиия оператора в работу $Q_ч$; соответствеиио вероятность отказа оператора $p_ч = 1 - Q_ч$.

Допустим, что известна плотиость распределеиия отказов оператора $r_ч(t)$. Очевидно, что

$$p_ч = \frac{\int\limits_{t_n}^{t_{n+1}} r_ч(t)\,dt}{\int\limits_{t_n}^{\infty} r_ч(t)\,dt} = \frac{\int\limits_{T}^{T+N} r_ч(t)\,dt}{\int\limits_{T}^{\infty} r_ч(t)\,dt}.$$

Распределеиие отказов

$$R(t) = \int\limits_{-\infty}^{T} r_ч(t)\,dt,$$

а с учетом $r_ч(t) = 0$ при $t < 0$

$$R(t) = \int\limits_{0}^{T} r_ч(t)\,dt;$$

отсюда

$$p_ч = \frac{R(t_{n+1}) - R(t_n)}{1 - R(t_n)} = \frac{R(T+N) - R(T)}{1 - R(T)};$$

$$Q_ч = \frac{1 - R(T+N)}{1 - R(T)}; \quad (65)$$

$$R(T+N) = 1 - Q_ч + Q_ч R(t) = p_ч + (1 - p_ч)R(t).$$

Функция распределения отказов оператора на интервале N

$$F(p_ч, T) = p_ч + (1 - p_ч) R(t). \quad (66)$$

Сопоставляя уравнения (64)—(66), видим, что уменьшая интервалы между тренировочными аварийными испытаниями, мы повышаем надежность оперативного управления, увеличиваем среднее время безаварийной работы системы. В то же время соответственно увеличивается дисперсия времени безаварийной работы $\overline{\sigma^2}$, т. е. разброс отдельных значений времени безаварийной работы относительно его среднего значения $\overline{T}$. Кроме того, тренировочные испытания могут стать помехой основной деятельности оператора.

Таким образом, необходимо найти верхнюю границу частоты испытаний. В ходе текущего контроля надежности деятельности оператора он сам может включать контрольную программу испытаний или контрольные сигналы могут подаваться особыми устройствами без его ведома. С другой стороны, результаты контроля могут поступать к самому оператору, его коллегам илиЭВМ и влиять на гибкое перераспределение функций с целью индивидуальной адаптации структуры управления по принципу «гибридного интеллекта».

Самостоятельное включение оператором контрольной программы обладает тем преимуществом, что при появлении реальных сигналов от системы оператор тотчас переключается на их обработку, однако результаты такого тестирования могут существенно искажаться (отличаться от среднего текущего качества работы оператора при решении реальных задач в зависимости от субъективного отношения оператора к тестам).

В табл. 19 приведены данные по среднему времени регулирования текущих и контрольных сигналов одной и той же группой испытуемых, но в первом варианте инструкции (I) испытуемым сообщалось, что они должны регулировать самостоятельно включаемые сигналы только для самоконтроля; во втором варианте (II) — что время регулирования контрольных сигналов имеет особое значение для оценки их квалификации; в третьем варианте (III) испытуемые не знали о том, какие именно сигналы являются контрольными. Для удобства сравнения время регулирования текущих сигналов принято за 100%.

Таблица 19

Среднее время регулирования сигналов

Вариант инструкции	Среднее время регулирования текущих сигналов, %	Среднее время регулирования контрольных сигналов, %
I	100	120
II	100	84
III	100	100

Необходимо отметить, что в двух опытах по первому варианту инструкции было отмечено малое время регулирования

контрольных сигналов, обусловленное, как выяснилось при опросе испытуемых, тем, что они опасались наличия в системе реальных сигналов в тот период, который они выбрали для самоконтроля, и поэтому стремились максимально сократить его.

Для объективного контроля текущей эффективности[1] действий оператора целесообразно применять устройства автоматической подачи контрольных задач и обработки результатов их решений. В программах таких устройств необходимо предусматривать выбор моментов для подачи контрольных задач, когда оператор не загружен обработкой реальных сигналов, и снятие тест-задач при возникновении напряженной ситуации на управляемом объекте.

Особую сложность в контроле текущей готовности оператора составляет обычное на практике разнообразие видов и уровней сложности возможных оперативных задач. В подобных случаях при контроле должны моделироваться все основные виды оперативных задач. В лабораторных экспериментах для контроля текущей готовности оператора по всему диапазону основных задач использовалась упрощенная вспомогательная модель управляемого объекта (которая служила также для предварительного проигрывания отдельных решений, см. п. 2). Программы контроля были двух типов: игровые и последовательного анализа.

Первый тип программ, предлагаемый нами для оценки типов СОИ (см. п. 25), сокращает среднее время контроля, но требует сложной универсальной вычислительной техники. Второй тип, напротив, требует больших затрат времени, но может быть реализован на сравнительно простых специализированных устройствах, разработанных в области автоматического поиска отказов технического оборудования.

Рассмотрим основные положения метода последовательного анализа текущей готовности оператора. Пусть результат анализа в каждом случае может быть представлен в виде одной из трех оценок: удовлетворительная готовность, неудовлетворительная готовность или отсутствие оценки.

Цель состоит в том, чтобы сократить затраты времени и, следовательно, число предъявляемых оператору контрольных задач за счет проведения только необходимых проверок и в оптимальной последовательности. Решение каждой контрольной задачи должно увеличивать вероятность предъявления на следующем шаге именно того теста, который выявит неудовлетворительную готовность оператора. Организационная структура системы оперативного управления может предполагать либо полную замену оператора сменщиком (или отключение данного

---

[1] Эффективиость решеиия коитрольиой задачи может быть приията в качестве оцеики уровия готовиости оператора к решеиию в даиный момеит реальиой задачи.

пункта управления), либо передачу части функций (одного или нескольких классов задач) данного оператора, в отношении которых его готовность неудовлетворительна, другим операторам данной системы, либо оперативное изменение параметров информационных (или других) средств, так чтобы удовлетворительное решение данного класса задач вновь стало возможным.

Рассмотрим второй вариант организации системы оперативного управления (очевидно, что первый вариант является частным по отношению ко второму).

Пусть M — полное множество контрольных оперативных задач, состоящее из подмножеств (классов) M_α. Обозначим удовлетворительно решаемые задачи α_p, неудовлетворительно — α_q.

Контроль решения задач на каждой ступени Π_α состоит в выявлении хотя бы одной неудовлетворительно решаемой оператором задачи из класса M_α.

Необходимо выбрать оптимальный алгоритм тестирования, обеспечивающий минимум затрат времени T_0 при длительности T_α каждой проверки Π_α. Случайный характер индивидуальных особенностей операторов и динамики их готовности, естественно, определяет применение статистических оценок эффективности используемых алгоритмов, например, среднего времени $\overline{T_\alpha}$. Если известно только распределение T_α, то по минимаксному критерию оптимальным следует считать алгоритм, минимизирующий максимально возможное время контроля.

Примем допущение

$$T_N = \sum_{\Pi_\alpha \in N} T_\alpha.$$

Для первого варианта организации системы управления было бы достаточно выявить хотя бы одну неудовлетворительно решаемую оператором задачу.

Однако для рассматриваемого нами более общего случая система тестов $N = (\Pi_1, \Pi_2, \ldots, \Pi_l)$ должна обеспечить проверку всех контрольных задач, т. е. $M = M_N$, где

$$M_N = \bigcup_{j=1}^{l} M_j. \tag{67}$$

Необходимо найти последовательность предъявления задач, удовлетворяющую условию (67) и принятому выше минимаксному критерию оптимальности.

Множество предъявлений контрольных задач $\Pi_1, \Pi_2, \ldots, \Pi_j, \ldots, \Pi_k$ можно сгруппировать в системы предъявлений $N_1, N_2, \ldots, N_i, \ldots, N_m$. Оптимальной должна быть признана система предъявлений N_i $(\Pi_{1i}), \Pi_{2i}, \ldots, \Pi_{li}$ такая, что $\left(\sum_{j=1}^{l} T_{ij}\right)_{\min i}$, где T_{ji} — время, затрачиваемое на j-е предъявление системы N_i.

Таким образом, в алгоритме работы описанной выше демпфирующей информационной системы может быть предусмотрено регулирование интенсивности потока сигналов как при их слишком частом поступлении путем временной задержки в буферной памяти второстепенных, так и при слишком редких сигналах путем подачи искусственных контрольных сигналов с учетом полученных соотношений при выборе частоты и последовательности контрольных и тренировочных испытаний.

Более типичной для современных информационных систем, бесспорно, является задача снижения максимумов сигналов, поступающих к человеку-оператору. Перейдем к рассмотрению решения этой задачи с применением изложенных выше методов теории массового обслуживания на некоторых конкретных примерах.

17 Исследование влияния интенсивности поступления сигналов на деятельность оператора в условиях аварии

Для проверки предположения о зависимости эффективности деятельности оператора в реальных условиях от объема оперативного отображения нами была спланирована и проведена серия экспериментов на ТЭЦ-21 Мосэнерго. Задача заключалась в том, чтобы выяснить, как зависит скорость ликвидации оператором наиболее экстренных нарушений режима (сигналов 1 и 2-й приоритетных групп) от общего числа сигналов всех групп, отображенных на СОИ. Поскольку пассивное ожидание естественно возникающих аварийных ситуаций требует огромных затрат времени, было решено провести на ТЭЦ по специальному разрешению Мосэнерго аварийные испытания. В отведенное для экспериментов ночное время было проведено 4 таких испытания, управление энергоблоком при которых осуществлялось поочередно четырьмя опытными операторами. Момент возникновения аварии и ее характер заранее оператору не сообщались. Аварии носили реальный характер, например, один из экспериментаторов внезапно отключал какой-либо один из основных агрегатов, скажем, дутьевой вентилятор.

В ходе возникновения, развития аварий и их ликвидации операторами в протоколах фиксировались моменты появления и снятия сигналов, характер технологических отклонений и все действия операторов. Время испытания разбивалось на двухминутные интервалы. Результаты наблюдений сведены в табл. 20.

При статистической обработке результатов наблюдений и анализе гистограммы было выдвинуто предположение, что поступление сигналов на мнемосхему блока подчинено закону Пуассона. В табл. 20 приведено расчетное значение критерия согласия $\varkappa^2$ Пирсона, с помощью которого определялась степень совпадения эмпирического распределения с распределением Пуассона.

В наиболее удобном для расчетов виде

$$\varkappa^2 = n \sum_{i=1}^{k} \frac{(p_i^* - p_i)^2}{p_i},$$

Статистическая обработка результатов наблюдений

Число сигналов за двухминутный интервал	Зафиксировано в процессе испытаний	Теоретическая вероятность	$\frac{(p_i^* - p_i)^2 \cdot 10^2}{p_i}$
1	6	0,0395	0,25
2	8	0,0948	0,45
3	16	0,1517	0,06
4	20	0,1820	0,05
5	24	0,1747	0,53
6	18	0,1398	0,07
7	12	0,0959	0,01
8	10	0,0575	0,15
9	2	0,0307	0,3
Число испытаний	116	$\chi^2 = 116 \sum_{1}^{9} \frac{(p_i^* - p_i)^2}{p_i} = 3,22$	
Математическое ожидание	4,8		

где p_i^* — теоретическая вероятность (определяется по таблицам);
p_i — приведенная частота событий в эксперименте;
n — число экспериментов;
k — число разрядов.

Известно, что $\varkappa^2$ является функцией числа степеней свободы. Зададимся следующими основными условиями (связями): 1) сумма вероятностей появления сигналов равна единице; 2) теоретическое и опытное средние значения должны совпадать.

При числе степеней свободы $r = 7$, вычисляемом как число испытаний минус число принятых допущений, и расчетном значении $X^2 = 3,22$ получаем, что эмпирическое распределение совпадает с теоретическим с доверительной вероятностью 0,9. Следовательно, гипотезу о распределении частот появления сигналов на мнемосхеме по закону Пуассона можно считать не противоречащей действительности. Тогда, очевидно, вероятность появления k сигналов за интервал η можно определять по известной формуле

$$p_k(\eta) = \frac{(\lambda\eta)^k e^{-\lambda\eta}}{k!}.$$

Анализ потока сигналов дал следующий количественный результат: математическое ожидание числа сигналов за двухминутный интервал $\lambda = 4,8$. Анализ интенсивности обработки оператором сигналов показал, что время обработки сигналов распределено по экспоненциальному закону. Средняя интенсивность обработки за двухминутный интервал $\mu = 2,8$. Среднее время, затрачиваемое на обработку одного сигнала,

$$\frac{\eta}{\mu} = \tau = \frac{2}{2,8} = 0,7 \text{ мин}.$$

Обработка экспериментальных данных проводилась в двух вариантах.

В первом анализировались в целом показатели обработки сигналов оператором энергетического блока. При этом рассчитывались следующие системные показатели деятельности оператора: средняя длительность ожидания сигналов при различных значениях интенсивности потока сигналов; вероятность немедленного обслуживания сигналов при его поступлении на мнемосхему (т. е. вероятность нулевого ожидания); плотности потоков λ_1 и λ_2 приоритетных групп, на которые должен разбиваться общий поток с интенсивностью $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$. Составляющая λ_1 — интенсивность потока сигналов двух высших приоритетных групп, скорость обработки которых прямо сказывается на времени ликвидации аварии. Составляющая λ_2 — интенсивность потока сигналов двух оставшихся низших групп, которые следует задерживать в буферном накопителе. В такой постановке при количестве обслуживающих приборов $n = 1$, пуассоновском входящем потоке и экспоненциальном времени обслуживания задача может быть решена с помощью изложенного выше простого аналитического метода. Необходимо подчеркнуть, что очевидна ограниченность такой постановки задачи, поскольку в этом случае не может быть определен один из основных интересующих нас параметров системы — оптимальное число сигнальных элементов СОИ. Зато общая качественная оценка системы может быть получена просто и быстро.

Во втором варианте обработки экспериментальных данных под обслуживающими приборами понимались индикационные элементы мнемосхемы. Такой подход позволяет исследовать влияние их числа на показатели деятельности оператора. Полный поток был разбит на четыре приоритетных группы. В дополнение к тем параметрам системы, которые определялись в первом варианте, рассчитывалось оптимальное число элементов СОИ. Для решения задачи нами был использован метод статистических испытаний математической модели системы массового обслуживания, воспроизведенной на цифровой вычислительной машине.

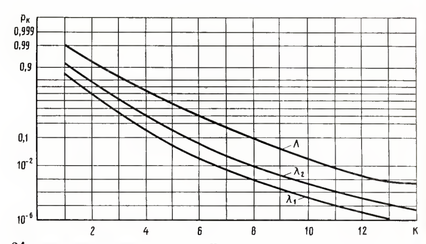
Первый вариант обработки экспериментального материала. Зная закон распределения вероятностей поступления сигналов на СОИ и параметр $\Lambda = 4{,}8$ сигнал/2 мин $= 2{,}4$ сигнал/мин, построим зависимость $p_k(k)$ при нескольких фиксированных λ (рис. 24).

Пользуясь известной формулой

$$\bar{\omega} = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)},$$

в которую в данном случае подставляется величина интенсивности обработки сигналов оператором $\mu = 1{,}4$ сигнала в минуту, получим зависимость $\bar{\omega}(\lambda)$ (рис. 25).

Подача сигналов на СОИ может быть организована так, чтобы по возможности исключить поиск оператором во всей совокупности сигналов наиболее важных и направить его действия на максимально быструю обработку сигналов, поданных на панель. Причем среднее время аварийных сигналов не должно превышать заданной величины ω_1^*. Предположим, что $\omega_1^* = 1{,}8$ мин. Тогда



24 *Вероятность появления не менее К сигналов в информационной системе*

с помощью графика (рис. 25) найдем $\lambda_1 = 1{,}0$ сигнала в минуту. Следовательно, весь пуассоновский поток сигналов $\Lambda = 2{,}4$ сигнала в минуту должен быть разбит на два: поток важнейших сигналов $\lambda_1 = 1{,}0$ сигнала в минуту, немедленно поступающих на СОИ, и поток сигналов низших групп $\lambda_2 = 1{,}4$ сигнала в минуту, который задерживается в буферном накопителе. На рис. 24 приведены кривые, соответствующие λ_1 и λ_2, с помощью которых можно определить вероятность поступления различного числа сигналов на СОИ и в буферный накопитель.

С помощью графика, представленного на рис. 25, определяются вероятности ненулевого ожидания сигналов $p\{\omega > 0\}$.

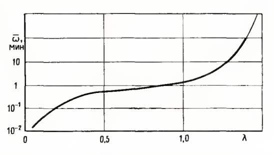
Анализ протоколов испытаний показал, что вероятность выделения человеком-оператором сигналов высшей приоритетной группы из общей совокупности сигналов составляла в среднем $p_1 = 0{,}95$. Следовательно, с вероятностью $p_2 = 0{,}05$ оператор включал в эту группу сигналы низших групп. В этом случае $\lambda_1' = \lambda_1 + 0{,}05\lambda_2 = 1{,}0 + 0{,}07 = 1{,}07$.

Данное явление в точности совпадает с увеличением реальных значений факторов, обусловливающих сложность задач, в частности — оперативного объема отображения (K_7) и числа критичных элементов (K_7') по сравнению с их теоретическими значениями, выявленными в гл. 2. При реальном значении $\lambda_1' = 1{,}07$ $\overline{\omega}_1' = 2{,}3$ мин вместо значения $\overline{\omega}_1 = 1{,}8$ мин при теоретическом значении $\lambda_1 = 1{,}0$. Последнее может быть достигнуто путем автоматического разделения сигналов на группы и задержки сигналов низших групп в буферном накопителе. Среднее время пребывания сигналов в системе в обоих случаях

$$\overline{U}_1 = \overline{\omega}_1 = \frac{\mu}{\lambda_1} = 2{,}5 \text{ мин};$$

$$\overline{U}_1' = \overline{\omega}_1' \frac{\mu}{\lambda_1'} = 3{,}0 \text{ мин}.$$

25 *Зависимость средней длительности ожидания от интенсивности потока сигналов*



Допуская, что время устранения возмущения в системе пропорционально среднему времени пребывания сигналов в системе и учитывая, что среднее время устранения аварийного возмущения во время испытаний на блоке $T' = 18$ мин, получим

$$T = \frac{T'\bar{U}_1}{\bar{U}'_1} = 15 \text{ мин.}$$

Ожидаемое сокращение среднего времени устранения аварии за счет оптимизации оперативного объема отображения путем автоматической задержки второстепенных сигналов составляет $\Delta T = 3{,}0$ мин, т. е. более 15%.

Анализ влияния числа воспринимаемых оператором индикационных элементов на эффективность его деятельности, как уже говорилось, был проведен методом статистических испытаний на модели системы.

Для блока котел — турбина разбиение сигналов на четыре приоритетные группы проводилось на основании анализа технологии, правил технической эксплуатации и динамических свойств объекта, а затем уточнялось с помощью специальной анкеты, распространенной среди операторов и обслуживающего персонала станции. Ниже приведены примеры сигналов разных приоритетных групп для параметров котлоагрегата.

Первая группа — аварийные сигналы: уровень и давление в барабане котла, температура перегретого пара (отклонение в сторону превышения).

Вторая группа — отклонения технологических параметров, которые могут привести к аварийным: давление питательной воды, расход питательной воды, расход топлива, расход конденсата на впрыск, отключения агрегатов (вентиляторов, дымососов).

Третья группа — прочие технологические отклонения: солесодержание насыщенного пара, разрежение в топке.

Четвертая группа — технико-экономические показатели: температура уходящих газов, температура вторичного воздуха, к. п. д. блока и др.

В дальнейшем в ряде работ была подтверждена целесообразность предложенного нами деления параметров энергоблока по важности на четыре группы: в табл. 21 приведены данные ЦНИИТЭИПриборостроения по

центному составу параметров энергоблока по четырем группам важности. Эти данные дополнительно свидетельствуют о перспективности метода задержки второстепенных сигналов для уменьшения оперативного объема отображения и сосредоточения оператора на наиболее экстренных сигналах, доля которых в среднем по номенклатуре параметров составляет всего 5% от общего объема, но абсолютное число которых периодически, при возникновении аварий резко возрастает.

Таблица 21

Процентный состав параметров энергоблока в зависимости от их важности

№ группы	Характеристика группы	% от общего числа
1	Особо ответственные параметры (выход за допустимые пределы ведет к аварийным ситуациям)	5
2	Параметры управления основным оборудованием . . .	45
3	Параметры управления вспомогательным оборудованием	30
4	Параметры, служащие для оценки общей ситуации на блоке	20

Во втором варианте обработки экспериментальных данных определялись следующие характеристики системы: а) среднее время ожидания сигналов из четырех приоритетных групп $\overline{\omega}_i$, где $i = 1, 2, 3, 4$; б) среднее число сигналов каждой группы в буферном накопителе $\overline{q}_i$; в) загрузка каждого элемента СОИ

$$\psi = \frac{1 - p\{\omega = 0\}}{n} = \frac{\lambda}{n\mu};$$

г) вероятность нулевого ожидания $p\{\omega = 0\}$.

Перечисленные параметры системы должны быть определены при различных числах сигнальных элементов n, которые могут включаться одновременно с целью нахождения $n_{\text{опт}}$. Система моделировалась при $n = 1 \div 9, 11$. Параметры потока сигналов были взяты из предыдущего анализа, но поток Λ был разбит на четыре приоритетные группы: $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4$ сигнал/мин, где $\Lambda = 2,4$; $\lambda_1 = 0,9$; $\lambda_2 = 0,75$; $\lambda_3 = 0,4$; $\lambda_4 = 0,35$.

Зависимость среднего времени обработки одного сигнала от числа одновременно поступающих сигналов (подключенных элементов СОИ) $\overline{\tau}(n)$ получена из анализа действий операторов в процессе ликвидации аварий; $\overline{\tau}(1) = 0,55$; $\overline{\tau}(2) = 0,5$; $\overline{\tau}(3) = 0,53$; $\overline{\tau}(4) = 0,55$; $\overline{\tau}(5) = 0,62$; $\overline{\tau}(6) = 0,68$; $\overline{\tau}(7) = 0,9$; $\overline{\tau}(9) = 1,3$; $\overline{\tau}(11) = 1,8$ мин.

Имитационная модель построена по принципу сканирования в моменты появления в системе сигналов и окончания обработки сигналов (ликвидации отклонений); по числу различных значений n ($n = 1 \div 7$, 9, 11) выполнено девять вариантов исследования модели системы. Моделирующий алгоритм, разработанный по нашей просьбе для экспоненциального закона распределения времени обслуживания А. А. Вдовиным и его сотрудниками в лаборатории теоретико-вероятностных методов ЦНИИКА, состоит из трех основных блоков.

Блок *А* служит для организации и управления алгоритмом, задает значения начальных параметров системы λ_1, λ_2, λ_3, λ_4, τ и n, а также некоторых вспомогательных величин. Кроме того, он контролирует длину реализации, осуществляет переход к очередному варианту исследований, определяет вид очередного момента сканирования и включает соответствующий блок *Б* или *В*.

Блок приема *Б* реализует изменение состояния системы в момент появления нового сигнала, который или сразу поступает на СОИ для обработки, или направляется в буферную память.

Блок выдачи *В* реализует изменение состояния системы в момент окончания обработки сигнала. Освободившийся элемент «средства отображения» может быть занят следующим сигналом, поступившим либо впервые, либо из буферного накопителя с учетом приоритетов.

Модель системы была воспроизведена на электронной цифровой вычислительной машине М-20. Для получения представительной статистики моделирование на ЭВМ М-20 каждого варианта системы проводилось при числе реализаций $N = 10\,000$. Результаты расчета вероятностных характеристик выдавались на широкую печать АЦПУ. Основные результаты приведены в табл. 22 и на рис. 26.

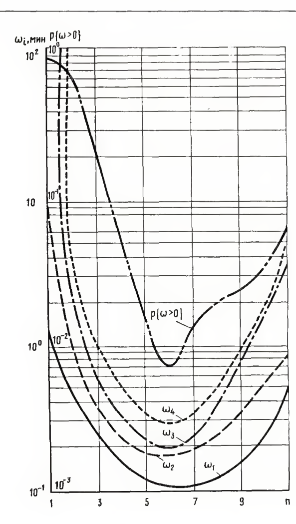
Таблица 22

Результаты статистических испытаний модели информационной системы на ЭВМ М-20

n	$\overline{\tau}$	ψ	$\overline{\omega}_1$	$\overline{\omega}_2$	$\overline{\omega}_3$	$\overline{\omega}_4$	p_0	$p\{\omega > 0\}$
1	0,55	0,999	1,15	10,34	1,269	2,065	10^{-4}	0,9999
2	0,50	0,61	0,47	1,01	2,64	6,25	0,268	0,732
3	0,53	0,427	0,227	0,317	0,533	0,48	0,830	0,170
4	0,55	0,331	0,169	0,210	0,297	0,49	0,944	0,056
5	0,62	0,297	0,112	0,208	0,228	0,336	0,983	0,017
6	0,68	0,279	0,108	0,164	0,194	0,291	0,993	0,007
7	0,9	0,319	0,110	0,195	0,248	0,332	0,989	0,011
9	1,13	0,342	0,146	0,331	0,667	0,766	0,976	0,024
11	1,8	0,324	0,46	0,82	3,32	4,53	0,939	0,061

Для контроля правильности построенного моделирующего алгоритма и оценки точности метода статистических испытаний было проведено сравнение результатов, полученных при $n = 1$ на модели и аналитическим способом. Сравнение результатов подтверждает вполне удовлетворительную точность использованного метода статистических испытаний.

Результаты исследования модели информационной системы показывают, что по критерию минимума времени ожидания ответственных сигналов в рассматриваемом случае оптимальным числом одновременно включающихся сигнальных элементов СОИ является $n_{опт} = 6$. Риск, связанный с задержкой сигналов первой и второй групп в буферном накопителе, оценивается вероятностью ненулевых ожиданий $p\{\omega_1 > 0\} = 7 \cdot 10^{-3}$. В то же время при одновременной подаче всех сигналов на СОИ, как это было в эксперименте, вероятность того, что оператор упустит из виду аварийный сигнал и не приступит к его обработке, ошибочно сосредоточившись из-за слишком большого



26 *Результаты статистических испытаний модели информационной системы на ЭВМ*

объема отображения на второстепенных сигналах при $n = 11$, $p\{\omega_1 > 0\} = 6 \cdot 10^{-2}$, т. е. почти в 10 раз больше.

Интересно проследить изменения характеристик системы в зависимости от различных входных величин, например τ, λ_i, в том числе λ_1, т. е. при авариях разных масштабов. Поскольку такой анализ поведения системы требует исследования весьма значительного числа ее вариантов, в целях экономии машинного времени вместо метода статистических испытаний был применен приближенный аналитический метод расчета, что потребовало некоторого упрощения системы. В частности, вместо смешанных приоритетов были приняты абсолютные с соответствующим преобразованием известных формул [105].

Ниже приводятся некоторые преобразованные соотношения. Средняя длина очереди i-го потока

$$q_i = \frac{\rho^K p_i}{K!\,(1-R_{i-1})(1-R_i)[KE_K(\rho)-\rho E_{K-1}(\rho)]},$$

где

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{n\mu}; \quad \rho = \frac{\sum_1^r \lambda_i}{n\mu};$$

$$R_i = \sum_1^i \rho_i; \quad E_K(\rho) = \sum_0^K \frac{\rho^K}{K!}.$$

Вероятность ненулевого ожидания

$$p\{\omega_i > 0\} = \frac{\rho^K}{(K-1)!\,[KE_K(\rho)-\rho E_{K-1}(\rho)]}.$$

В связи с тем, что на основании результатов расчета характеристик информационной системы даются рекомендации об оптимальном числе сигнальных элементов (или контрольно-измерительных приборов) на СОИ $n_{опт}$, весьма существен вопрос выбора критериев, по которым оценивается эффективность деятельности оператора при различных объемах оперативного отображения. Наиболее важными с точки зрения управления являются следующие параметры рассматриваемой информационной системы с регулируемой интенсивностью потока сигналов: среднее время ожидания сигналов в буферном накопителе $\overline{\omega}_i$; среднее время пребывания сигналов в системе $\overline{U}_i$; вероятность задержки сигналов в буферном накопителе $p\{\omega_i > 0\}$.

Необходимо подчеркнуть, что для разных объектов и функций оператора такие параметры, как $\overline{\omega}_i$ и $\overline{U}_i$, могут иметь разное значение. В случае, если оператор выполняет управляющие, т. е. дискретные воздействия, например в ответ на появившийся сигнал производит серию переключений положения органов управления, состояния электродвигателей и т. п., причем, как это часто бывает, уже первое переключение из подобной серии практически предотвращает дальнейшее развитие нарушения технологического режима, важнейшим показателем будет время ожидания сигнала $\overline{\omega}_i$.

В других случаях, когда основной функцией оператора является регулирование технологических параметров, более важное значение может приобретать полное время пребывания сигнала в системе $\overline{U}_i$, т. е. временной интервал от момента появления отклонения технологического параметра до его возвращения к заданной величине, характеризующийся технико-экономическими потерями вследствие ухудшения технологического режима.

При расчете описанной выше конкретной системы мы исходили из анализа реальных аварий, наиболее типичной причиной которых было внезапное отключение различных вспомогательных агрегатов. При этом операторы должны были в первую очередь включить резервные электродвигатели и перестроить соответствующим образом технологическую схему объекта, т. е. произвести управляющие воздействия. В связи с этим в качестве основного критерия при выборе $n_{\text{опт}}$ учитывалось минимальное среднее время ожидания сигналов первой группы $\overline{\omega}_{1\,\min}$. Вообще, если для ряда n $\overline{\omega}_{1\,\min} = \text{const}$, то критерием является $\overline{\omega}_{2\,\min}$, затем $\overline{\omega}_{3\,\min}$ и, наконец, $\overline{\omega}_{4\,\min}$. Если $\overline{\omega}_{1\,\min}$, $\overline{\omega}_{2\min}$, $\overline{\omega}_{3\,\min}$ и $\overline{\omega}_{4\,\min}$ оказываются одинаковыми для нескольких n, то $n_{\text{опт}}$ выбирается из условия $n_{\text{опт}} = n_{\min}$, для которых $\overline{\omega}_{i\,\min} = \text{const}$.

В случае регулирующих функций операторов вместо $\overline{\omega}_{i\,\min}$ в расчет принималось бы $\overline{U}_{i\,\min}$. Для случая смешанных функций оператора — управляющих и регулирующих — следует принимать наибольшее из двух значений $n_{\text{опт}}$, определенных по $\overline{\omega}_{i\,\min}$ и $\overline{U}_{i\,\min}$.

Наряду со средними характеристиками системы важное значение имеют вероятностные характеристики, такие как $p\,\{\omega > 0\}$ или $p\,\{\omega > \omega^*\}$. Чаще всего $n_{\text{опт}}$ по $\overline{\omega}_{i\,\min}$ совпадает с $n_{\text{опт}}$ по $p_{\min}\,\{\omega > 0\}$.

Напротив, $n_{\text{опт}}$, выбранные по $\overline{\omega}_{i\,\min}$ и $\overline{U}_{i\,\min}$, могут различаться весьма существенно в зависимости от соотношения величин $\overline{\omega}_i$, $\overline{U}_i$ и $\overline{\tau}$.

Теперь перейдем к анализу возможных изменений эффективности деятельности оператора и показателей функционирования системы, исследовавшейся в ходе экспериментальных аварий, при отклонении различных параметров информационных потоков. В первую очередь необходимо рассчитать, как будет изменяться оптимальное значение оперативного объема отображения, если, например, при прочих постоянных условиях возрастет интенсивность потока аварийных сигналов λ_1, потока сигналов о важных технологических отклонениях λ_2 или оператор снизит темп обработки сигналов $(\overline{\tau'} - \overline{\tau})$ и т. д.

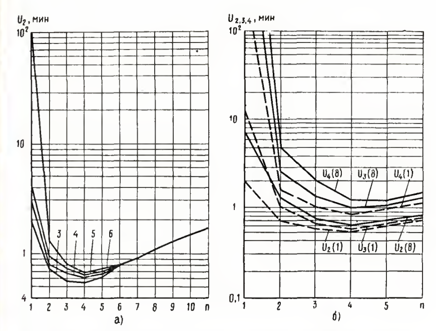
В качестве исходной системы (вариант 1) примем информационную систему со средними параметрами, которые ранее были выявлены при аварийных испытаниях на ТЭЦ. Ее характеристики $(\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)$:

$\lambda_1 = 0{,}9$; $\lambda_2 = 0{,}75$; $\lambda_3 = 0{,}4$; $\lambda_4 = 0{,}35$;

$\tau(n): \tau(1) = 0{,}55$; $\tau(2) = 0{,}5$; $\tau(3) = 0{,}53$; $\tau(4) = 0{,}55$;

$\tau(5) = 0{,}62$; $\tau(6) = 0{,}68$; $\tau(7) = 0{,}9$; $\tau(9) = 1{,}3$,

 $\tau(11) = 1{,}8$.



27 *Результаты аналитического расчета параметров системы на ЭВМ*:
а — варианты 3, 4, 5, 6; *б* — варианты 1 и 8

В качестве примера проанализируем изменения показателей работы оператора и всей системы в случае, если поток аварийных сигналов λ_1 возрастает до $\lambda_1 = 1{,}0$ (вариант 2): $\lambda_1 = 1{,}1$ (вариант 3); $\lambda_1 = 1{,}2$ (вариант 4); $\lambda_1 = 1{,}3$ (вариант 5); $\lambda_1 = 1{,}8$ (вариант 6).

Результаты расчета $\overline{U}_1$ как функции от n для вариантов 3, 4, 5 и 6 представлены графически на рис. 27. Величина $\overline{\omega}_1$, а следовательно, и $\overline{U}_1$ возрастает равномерно с увеличением λ_1 при $n = 1, 2, 3$. Однако уже $n = 4$ достаточно, чтобы сделать $\overline{\omega}_1$ пренебрежимо малым; поэтому для $n \geqslant 4$ $\overline{U}_1$ практически не зависит от λ_1 (в рассматриваемых пределах изменений λ_1). Легко увидеть, что величина $\overline{\tau}$, являющаяся характеристикой деятельности оператора, влияет на параметры системы $\overline{\omega}_i$ и $\overline{U}_i$ сильнее и, следовательно, она объективно важнее, чем характеристики входящего потока λ_1, λ_2, λ_3, λ_4, т. е. собственные параметры объекта. Отсюда следуют по крайней мере два вывода: 1) необходимость точного учета величины $\overline{\tau}$; 2) возможность эффективно влиять на характеристики системы, уменьшая среднее время обработки оператором сигналов за счет более правильной организации его деятельности, в частности, оптимизируя оперативный объем представляемой ему информации.

Несколько дополнительных замечаний о физическом смысле параметра n. В описанных экспериментах n — число отдельных показывающих приборов, к которым поочередно подключались выходы регулируемых объектов (динамических звеньев). В других случаях под n может пониматься число групп приборов, сигнальных ламп или табло, отражающих связанные комплексные события, одновременно включаемых на СОИ, а иногда — соответствующее число линий связи между информационной или управляющей машиной и СОИ. В последнем варианте описанный принцип регулирования интенсивности потока сигналов позволяет не только повысить эффективность системы оперативного управления, но и сократить число приборов и элементов СОИ, его общие размеры, а также число кабельных соединений. Экономия на соединительных линиях тем существеннее, чем больше расстояние между СОИ и информационной вычислительной машиной. Следовательно, в этих случаях машину следует устанавливать не на центральном операторском пункте, а вблизи технологического оборудования. Одна из возможных схем предварительной обработки информации: входной коммутатор — арифметическое устройство — устройство сравнения (анализ приоритетов) — выходные преобразователи (здесь уже проходят только сигналы высших групп с учетом $n_{\text{опт}}$ — СОИ). Сигнал высших групп ожидают на входном коммутаторе или в оперативном запоминающем устройстве.

Результаты экспериментов в реальных условиях на ТЭЦ подтвердили наличие влияния оперативного объема отображения на деятельность оператора и необходимость оптимизировать этот параметр СОИ.

Предложенный нами метод исследования деятельности оператора блока ТЭЦ, основанный на проведении специальных испытаний и обработке их результатов методами теории массового обслуживания, получил распространение и дал положительные результаты при оценке различных типов СОИ [21, 122].

Опыты на ТЭЦ выявили наряду с описанным В. Д. Небылицыным [86] явлением «рефрактерности» внимания при авариях обратное явление — рассредоточение внимания, включение некоторыми операторами второстепенных сигналов в число аварийных. В. Д. Небылицын, с которым мы обсуждали эти результаты, подтвердил целесообразность учета индивидуальных особенностей и конкретного состояния операторов в процессе адаптации состава и структуры СОИ к их деятельности.

Глава

6

Экспериментальное исследование влияния объема представляемой информации на эффективность деятельности и сдвиги психофизиологических показателей

18 Методика и ход экспериментов

Строгое исследование оптимального объема отображения на примере деятельности оператора ТЭЦ весьма затруднено прежде всего из-за наличия сложных связей между параметрами и многообразия используемых типов СОИ. В то же время из практики известно немало видов деятельности, изучение которых в плане влияния оперативного объема отображения не связано с указанными трудностями.

Для дальнейших лабораторных исследований влияния на показатели эффективности деятельности и психофизиологическое состояние человека статистических характеристик потока сигналов и числа приборов, посредством которых они предъявляются человеку, была выбрана деятельность операторов-регулировщиков радиотелефонной системы [1].

Эта система удобна в нашем случае тем, что структура обработки сигналов, статистические характеристики их потоков и дисциплина обслуживания допускают наряду со статистическими испытаниями моделей системы расчет некоторых ее параметров аналитическими методами, развитыми в теории массового обслуживания и теории информации.

Моделируемая в лаборатории деятельность характеризуется следующим.

1. Испытуемый находится за пультом, на приставке к которому располагаются приборы, отображающие величину

---

[1] Данная схема рассматривается как пример, а не как конкретный вид техники.

отклонения параметров от нормального нулевого значения, которому соответствует вертикальное положение стрелок приборов, в изолированной, свето- и звуконепроницаемой электрофизиологической камере.

2. Потоки сигналов на входе системы (до анализатора) простейшие, с пуассоновским распределением. Каждый поток разделен на две группы: $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2$.

Первый поток наделен относительным приоритетом: из памяти анализатора в первую очередь на приборы пропускаются сигналы первой группы. Среди ожидающих сигналов одной группы действует правило: «первым пришел — первым обслужен». Сигналы, уже поступившие на приборы, по важности не различаются, таким образом, испытуемый от анализа очередности освобожден: сигналы могут обрабатываться в любом порядке, однако главный критерий оценки деятельности по минимальному значению интегрального критерия качества процессов регулирования требует в первую очередь заниматься устранением максимального отклонения, а второй критерий — минимум среднего времени обработки сигналов требует заниматься теми сигналами, обработка которых может быть завершена быстро (где уже малые отклонения). В результате оператор поочередно посылает регулирующие импульсы различными органами управления.

Потоки сигналов использовались в восьми вариантах плотности: № 1: $\lambda_1 = 0{,}01$ (сигнала в минуту), $\lambda_2 = 0{,}01$; № 2: $\lambda_1 = 0{,}02$, $\lambda_2 = 0{,}01$; № 3: $\lambda_1 = 0{,}02$, $\lambda_2 = 0{,}02$; № 4: $\lambda_1 = 0{,}03$, $\lambda_2 = 0{,}02$; № 5: $\lambda_1 = 0{,}03$, $\lambda_2 = 0{,}03$; № 6: $\lambda_1 = 0{,}04$, $\lambda_2 = 0{,}03$; № 7: $\lambda_1 = 0{,}04$, $\lambda_2 = 0{,}04$; № 8: $\lambda_1 = 0{,}05$, $\lambda_2 = 0{,}04$.

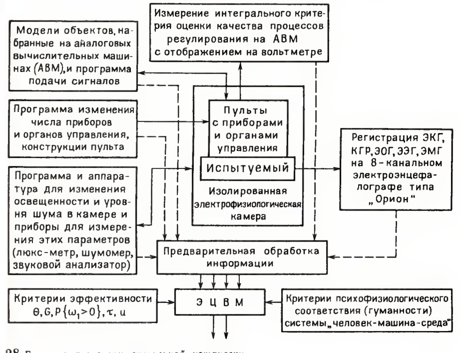
3. Случайная последовательность сигналов соответствующего варианта плотности повторяется через каждые 20 мин. Этот интервал принят в качестве единичного цикла эксперимента. За цикл, например, при наиболее употребимых вариантах потока в систему и на приборы поступает: при восьмом варианте 105 сигналов (64 первой и 41 второй группы), при третьем варианте — 41 (27 — первой и 14 — второй группы).

4. Число приборов (и соответствующих им органов управления) изменялось от $n = 1$ до $n = 6$.

5. При $n > 1$ сигналы подавались с одинаковой частотой на все приборы в случайной последовательности. Если все приборы заняты, то из памяти системы сигнал подавался на только что освободившийся прибор.

6. Динамика регулируемых контуров описывается уравнениями апериодических (инерционных) звеньев первого порядка с постоянными времени в пределах 11—16 с и коэффициентами усиления от 1 до 1,8.

7. Внешние условия в камере: освещенность $L = 65$ лк, средний уровень шума 45 дБ.



28 *Блок-схема экспериментальной установки*

8. Регистрируемые параметры эффективности: время обработки оператором каждого сигнала τ, время пребывания сигнала на приборе θ, время ожидания сигнала в памяти системы ω, общее время пребывания сигнала в системе $U = \theta + \omega$, интегральный критерий оценки качества процесса регулирования I.

9. Регистрируемые психофизиологические показатели (ПФП): электрокардиограмма (ЭКГ); электроокулограмма (ЭОГ) — горизонтальная ($ЭОГ_г$) и вертикальная ($ЭОГ_в$) составляющие; электроэнцефалограмма (ЭЭГ), в частности α (ЭЭГ-α) и θ (ЭЭГ-θ) ритмы; кожногальваническая реакция. Каждый ПФП регистрировался в виде диаграммы — графика изменения реакции и в виде интеграла данной функции.

10. Аппаратура: а) для моделирования регулируемых объектов и расчета текущих значений показателей эффективности применялись аналоговые вычислительные машины типа МН-7 и МПТ-9; б) для регистрации ПФП применялся комплекс электрофизиологической аппаратуры — электроэнцефалограф типа «Орион» с анализатором и интегратором сигналов. Для автоматического анализа и подачи сигналов на приборы было разработано специальное устройство.

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 28.

Перед началом опыта в течение 10 мин записывалось начальное фоновое значение ПФП — исходное состояние испытуемого. Затем подавалась команда «Внимание» и включалась программа подачи сигналов первого 20-минутного цикла. Опыт состоял из 6 циклов и длился при постоянных условиях 2 ч. На приборах в случайной последовательности (но с определенными статистиками) отображались отклонения параметров, испытуемый должен был их ликвидировать, регулируя контур органом управления, посылая импульсы соответствующих знака и длительности в зависимости от направления и величины отклонения параметра. Воздействие на органы управления осуществлялось обеими руками.

В экспериментах участвовало 10 испытуемых — мужчины в возрасте от 25 до 33 лет, проходившие предварительное обучение до выработки устойчивого сенсомоторного навыка при регулировании параметров.

---

19 Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты экспериментов рассчитывались путем восстановления хода реального опыта посредством модели, воспроизведенной на ЭВМ БЭСМ-6. Блок-схема программы расчета приведена на рис. 29. Интервалы усреднения данных: 300 с и 20 мин.

Основные показатели рассчитывались по протоколам экспериментов следующим образом:

1. Время ожидания сигнала ω_i (i — номер группы) определялось от момента поступления сигнала в систему до подачи его на прибор.

2. Время пребывания в системе $U_i = \omega_i + \theta_i$.

3. Число фактически занятых приборов рассчитывалось в течение интервала отображения каждого к-го сигнала:

$$n_{\text{ф}}\,(\theta^{\text{к}}) = \frac{\sum\limits_{1}^{q} \Delta t_j n_{\text{ф}}}{\theta^{\text{к}}},$$

где $\theta^{\text{к}} = \Delta t_1 + \cdots \Delta t_j + \cdots \Delta t_q$;

Δt_j — интервалы между моментами изменения состояния приборов (ухода обработанных или прихода новых сигналов на приборы).

Число фактически занятых сигналами приборов $n_{\text{ф}}$ округлялось до шага 0,25 ($n_{\text{ф}} = 1$; 1,25; 1,5 и т. д. до $n_{\text{ф}} = n_{\text{номин}}$).

4. Длительность пауз $\Delta t_п$ — сумма интервалов, когда все приборы свободны.

5. Чистое время обработки оператором сигнала

$$\tau^к = \sum_{i}^{q} \frac{\Delta t_j}{n_{\phi j}} - \xi^к,$$

где $\xi^к$ — время ожидания $к$-го сигнала на приборе (сумма интервалов между импульсами, когда оператор занимается регулированием других отображенных сигналов);

$$\xi^к = \sum_{0}^{q} \frac{\Delta t_j\,(n_{\phi j} - 1{,}65)}{n_{\phi j}} \approx \theta^к\,\frac{\overline{n}_\Phi^к - 1{,}65}{\overline{n}_\Phi^к}.$$

6. Качество обработки $к$-го сигнала

$$i^к = \frac{I}{M}\cdot\frac{\theta^к}{\overline{\theta}},$$

где I — интеграл, приходящийся на все M обработанных сигналов.

7. Вероятность пребывания сигнала в системе дольше 30 с $p\,\{V_1 > 30\text{ с}\} = p_1$ и дольше 55 с $p\,\{V_1 > 55\} = p_2$, что соответствует верхней границе хорошего показателя $V_1 = 30$ с и нижней границе неудовлетворительного $V_2 = 55$ с.

8. Для всех ПФП рассчитывалась величина относительного сдвига

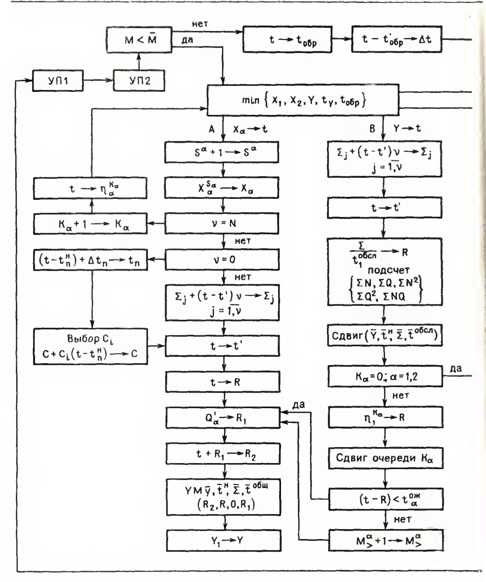
$$\Delta\,ПФП = \left|\frac{ПФП}{ПФП_0} - 1\right|,$$

где $\Delta\,ПФП$ — относительный сдвиг $ПФП$ за интервал Δt;
$ПФП$ — абсолютная величина ПФП в конце Δt;
$ПФП_0$ — начальное, фоновое значение данного ПФП.

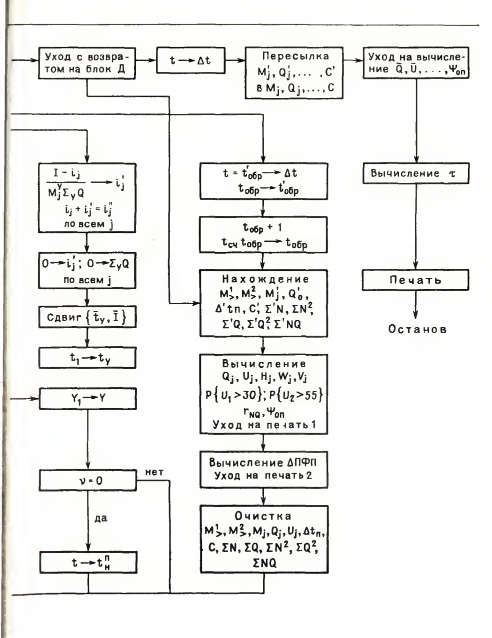
Далее сдвиги ПФП усреднялись по интервалам и вычислялся ряд их статистик.

Обработка экспериментального материала проведена Вычислительным центром ЦНИИКА.

Обозначения на блок-схеме программы обработки данных (см. рис. 30):
M — число обработанных сигналов;
$\overline{M}$ — максимальное число сигналов (за 20 мин);
$X_{\alpha+1}$ — ближайший момент поступления сигнала $(\alpha + 1)$-й группы, где $\alpha = 0{,}1$;
y — ближайший момент освобождения прибора;
t_y — ближайший момент замера;
$t_{обр}$ — ближайший момент обработки результатов;
t — текущее время;
t' — последний момент изменения количества занятых приборов;



29 *Блок-схема программы обработки экспериментальных данных на ЭВМ*



Уход с возвратом на блок Д
t → Δt
Пересылка $M_j', Q_j', \ldots, C'$ в $M_j, Q_j, \ldots, C$
Уход на вычисление $\bar{Q}, \bar{U}, \ldots, \Psi_{оп}$
Вычисление τ
Печать
Останов
$\frac{I - i_j}{M_j^y \Sigma_y Q} \to i_j'$
$i_j + i_j' = i_j''$
по всем j
$0 \to i_j'$; $0 \to \Sigma_y Q$
по всем j
Сдвиг $\{\bar{t}_y, \bar{I}\}$
$t_1 \to t_y$
$Y_1 \to Y$
ν = 0
нет
да
$t \to t_н^п$
$t = t_{обр}' \to \Delta t$
$t_{обр} \to t_{обр}'$
$t_{обр} + 1$
$t_{сч}\, t_{обр} \to t_{обр}$
Нахождение
$M_>^1, M_>^2, M_j', Q_0'$, $\Delta' tn, C', \Sigma' N, \Sigma N^2$, $\Sigma' Q, \Sigma' Q^2, \Sigma' NQ$
Вычисление
Q_j, U_j, H_j, W_j, V_j
$P\{U_1 > 30\}; P\{U_2 > 55\}$
$r_{NQ}, \Psi_{оп}$
Уход на печать 1
Вычисление ΔПФП
Уход на печать 2
Очистка
$M_>^1, M_>^2, M_j, Q_j, U_j, \Delta t_п$, $C, \Sigma N, \Sigma Q, \Sigma N^2, \Sigma Q^2$, ΣNQ

$S^{\alpha+1}$ — количество поступивших сигналов $(\alpha+1)$-й группы;

$\{X^i_{\alpha+1}\}$ — моменты поступления сигналов $(\alpha+1)$-й группы за один цикл;

V — количество занятых приборов;

N — количество приборов в данном опыте;

$K_{\alpha+1}$ — длина очереди сигналов $(\alpha+1)$-й группы;

$\{\eta_j^{\alpha+1}\}\ (j=\overline{1,\ K_{\alpha+1}})$ — моменты постановки в очередь сигналов $(\alpha+1)$-й группы;

$t^{н}_{п}$ — момент начала последней паузы;

$\Delta t_{п}$ — суммарная длительность пауз за 5 мин;

$\Delta t'_{п}$ — суммарная длительность пауз за цикл (20 мин);

$M^1_{>}$ — число заявок 1-й группы за 5 мин, ожидавших более 30 с;

$M^2_{>}$ — число заявок 2-й группы, ожидавших более 55 с;

$M^{1'}_{>}$, $M^{2'}_{>}$ — аналогично предыдущему, только за цикл (20 мин);

$\Sigma N, \Sigma\theta, \Sigma N^2, \Sigma\theta^2, \Sigma NQ$ — накопители для подсчета коэффициентов корреляции за 5 мин;

$\Sigma' N, \Sigma'\theta, \Sigma' N^2, \Sigma'\theta^2, \Sigma NQ$ — то же за 20 мин;

$\{y_i\} - (i=\overline{1,\ N})$ — моменты окончания обслуживания;

$\{t^{н}_i\} - (i=\overline{1,\ N})$ — моменты поступления в систему обслуживаемых сигналов;

$\{\Sigma_i\} - (i=1,\ \overline{N}) - \Sigma i = \Sigma\,\Delta t_j n_j$ — время обслуживания;

n_j — фактическое число занятых приборов, соответствующих Δt_j;

$\{t^{обсл}_i\} - (i=\overline{LN})$ — время обслуживания на приборах соответствующих сигналов;

$S_1,\ S_2$ — максимальное число сигналов 1 и 2-й групп соответственно;

$\{Q^i_1\}$ — время обслуживания сигналов 1-й группы;

$\{Q^i_2\}$ — время обслуживания сигналов 2-й группы;

$\{t^i_y\}$ — моменты замеров;

$\{y_i\}$ — замеры;

$\{t^i_{обр}\}$ — моменты обработки результатов ($t^1_{обр}=5$ мин, $t^2_{обр}=10$ мин, $t^3_{обр}=15$ мин, $t^4_{обр}=\infty$);

$t^{ож}_1,\ t^{ож}_2$ — предельное значение времени ожидания соответственно 30 и 55 с;

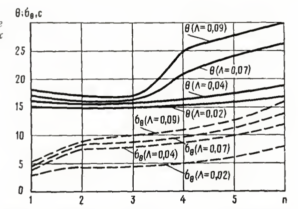
$M_j\ (j=1,\ 4N-3)$ — число сигналов, прошедших обслуживание при занятости в среднем j приборов (за 5 мин);

Q_j — суммарное время обслуживания для сигналов, прошедших обслуживание при занятости в среднем j приборов (за 5 мин);

V_j — суммарное время пребывания в системе сигналов, прошедших обслуживание при занятости $n_ф = j$ (за 5 мин);

$\Sigma_y Q$ — суммарное время обслуживания сигналов, прошедших обработку (за время между двумя последовательными замерами);

30 *Экспериментальные данные о зависимостях* $\theta(\Lambda, n)$ *и* $\sigma_\theta(\Lambda, n)$



$i'_j M^y_j$ — промежуточные счетчики для подсчета качества обработки сигналов (за время между двумя замерамн);

УП1 — блок подготовкн программы по параметрам, зависящим от потоков н от количества приборов;

УП2 — блок подготовки программы по параметрам, зависящим от обслуживания и подготовки к началу счета;

УМ — упорядочиваине момеитов по вектору $\overline{y}$.

Программа составлеиа на языке Алгол-60.

Безусловио, программа обработки эксперимеитальных даниых была бы существеино проще, если бы даиные иепосредствеиио в ходе опытов вводнлись в ЭВМ. В иашем случае обработка данных велась по разомкиутому циклу после их иакоплеиия путем моделнрования иа ЭВМ хода эксперимента.

Результаты статистической обработки данных представлены в табл. 23 и в виде графиков на рис. 30—33.

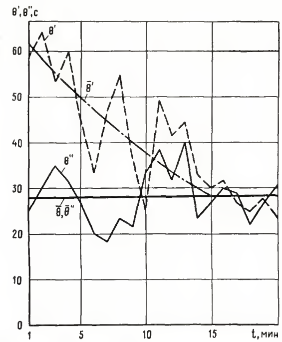
На рис. 30 приведены наиболее полные, усредненные по всем опытам данные о зависимости времени отображения сигнала на приборе (θ) и его среднеквадратического отклонения (σ_θ) от интенсивности потока сигналов ($\Lambda = 0{,}02$; $0{,}04$; $0{,}07$ и $0{,}09$ сигнала в секунду) и числа приборов, на которых они отображаются ($n = 1 \div 6$).

При малых интенсивностях потока ($\Lambda = 0{,}04$) θ практически не зависит от n. При интенсивностях $\Lambda = 0{,}07$; $0{,}09$ эта зависимость особенно резко проявляется при переходе от $n = 3$ к $n = 4$. Данные экспериментов и особенно отчеты некоторых испытуемых свидетельствуют о том, что операторы, регулирующие параметры по приборам, иногда мысленно объединяют их показания по три в некоторый комплекс координат по типу трех ортогональных координат точки в пространстве и, как сказал один из испытуемых, «гонят точку к началу координат (0, 0, 0), стараясь сначала подтянуть отстающую координату, а затем убрать ту координату, которая ближе всех к нулю, и перейти к меньшему числу координат — к плоскости, а затем к линии». Аналогия, проводимая испытуемыми между искус-

Таблица 23

Средние сдвиги ПФП в опытах с $\Lambda = 0{,}09$

Психофизиологические показатели	Интервалы опыта, мин												Средние значения	
	0—20		20—40		40—60		60—80		80—100		100—120			
	Число приборов													
	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6
ЭОГ$_{в}$	0,51	1,33	0,49	1,36	0,507	1,17	0,68	1,24	0,93	1,16	0,87	1,55	0,66	1,3
ЭОГ$_{г}$	0,88	1,67	0,616	1,7	0,81	1,5	0,94	1,52	0,84	1,62	0,75	1,53	0,81	1,59
КГР	1,03	0,82	1,11	2,09	0,86	0,9	1,138	1,96	2,055	4,03	0,93	5,24	1,187	2,34
ЭЭГ-α	0,583	0,99	0,42	0,74	0,54	0,747	0,49	2,0	0,84	2,7	0,48	1,8	0,56	1,5
ЭЭГ-θ	1,59	4,5	0,7	2,2	0,7	2,1	0,6	3,3	0,73	3,6	1	6,2	1,14	3,6
ЭКГ (пульс)	0,41	1,3	0,67	0,758	0,31	0,33	0,09	0,89	0,09	0,301	0,33	0,45	0,33	0,67

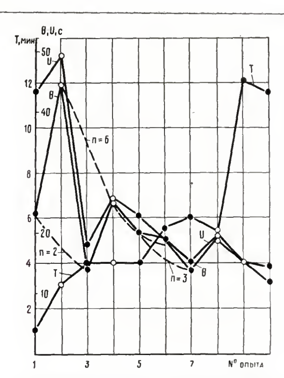


31 *Сравнение динамики изменения θ в 1-м и 2-м циклах ($\bar{\theta}$ — среднее значение по всем циклам)*

ственным пространством, в котором, «движется управляемая точка», и естественным пространством, как оказалось, помогает им одновременно уменьшать значения интегрального критерия качества процессов регулирования (I) и следить за временем обработки.

Это обстоятельство подсказывает необходимость в дальнейших исследованиях процессов аналогового регулирования параметров по приборам соотносить получаемые результаты с данными психологических исследований процессов пространственного восприятия и связанных с ним сенсомоторных реакций, проведенных в ЛГУ под руководством Б. Г. Ананьева.

Анализ изменения таких показателей эффективности регулирования параметров, как θ, U, ω, в ходе длительного опыта показал, что при потоке сигналов с малой интенсивностью ($\Lambda = 0{,}04$) это изменение незначительно. При повышении интенсивности до $\Lambda = 0{,}09$ сигн/с в ряде случаев наблюдалась тенденция к улучшению некоторых показателей, особенно при переходе от первого ко второму циклу. Процесс врабатывания показан на рис. 31. Динамика этого процесса несколько напоминает динамику показателей при обучении. Эти результаты также свидетельствуют о необходимости 15—20-минутного периода вхождения испытуемых в работу, после чего данная деятельность становится стабильной и могут начинаться контрольные замеры.

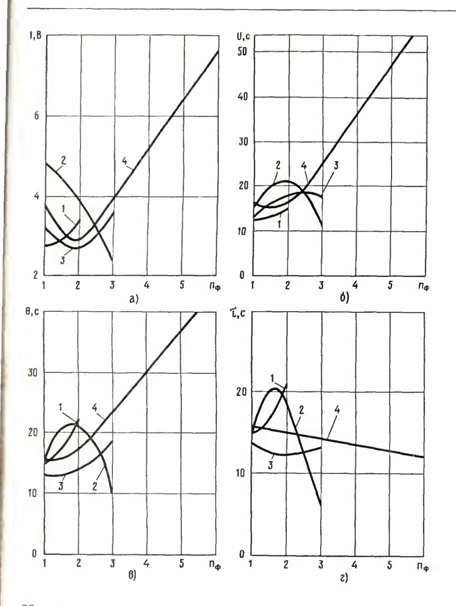


32 *Средние значения показателей эффективности деятельности* θ, *U и T* (*штриховыми линиями обозначено изменение показателей в ходе обучения при повторении условий опыта*)

Полученные данные позволяют выбрать оптимальное число приборов для исследовавшихся процессов регулирования: большинство лучших показателей при $\Lambda = 0{,}09$, $\bar{L} = 64$ лк и $\bar{H} = 45$ дБ приходится на $n = 3$. Исключение составляет первый цикл, в котором испытуемые лучше работают (судя по θ и σ_θ) с двумя приборами, что свидетельствует о необходимости в некоторых случаях в ходе деятельности с учетом конкретных результатов изменять способы отображения информации.

Преимущество $n = 3$ перед $n = 6$ сказывается и в показателях напряженности (активности) глазодвигательного поведения: число импульсов интегратора ЭОГ в минуту при $n = 2$ и $n = 3$ практически не различается и намного меньше, чем при $n = 6$. Трем приборам ($n = 3$) соответствуют также быстрое обучение и высокая стабильность показателей деятельности. Это видно, например, из рис 32, на котором приведены средние данные всех опытов. Штриховые линии соединяют опыты с одинаковыми условиями (n и Λ).

Поскольку поток сигналов случайный и сигналы распределены во времени неравномерно (частые сигналы сменяются паузами), необходимо проследить зависимость показателей работы не только от номинального (установленного) числа приборов $n_н$, но и от числа фактически занятых приборов $n_ф$. Такие данные приведены на рис. 33.



33 *Усредненные данные о влиянии числа фактически занятых приборов $n_ф$ на эффективность деятельности оператора (условия, при которых получают зависимости):*

1 — $\Lambda = 0{,}09$, $n = 2$; *2* — $\Lambda = 0{,}04$; $n = 3$; *3* — $\Lambda = 0{,}09$; $n = 3$; *4* — $\Lambda = 0{,}09$; $n = 6$; *а* — $I(n_ф)$; *б* — $U(n_ф)$; *в* — $\theta(n_ф)$; *г* — $\tau(n_ф)$

Таблица 24

Интегральные показатели активности ритмов ЭЭГ (в относительных единицах)

Психофизиологические показатели	Испытуемые																Средние по всем испытуемым		Критерий Стьюдента и доверительная вероятность
	I				II				III				IV						
	Число приборов в опытах																		
	3	6	6	3	3	6	6	3	3	6	6	3	3	6	6	3	$n=3$	$n=2$	
$\beta_и$	1,2	2,8	1,1	1,2	1,4	1,7	1,2	1,0	1,2	1,2	1,3	0,9	0,8	1,6	1,2	0,0	1,1	1,5	2,86 0,95
$\sigma_{\beta_и}$	0,3	0,7	0,1	0,1	0,3	0,4	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,9	0,6	0,8	0,3	0,3	0,33	0,45	
$\beta_в$	1,4	2,5	1,2	1,2	1,8	2,2	1,5	1,2	1,1	1,1	1,3	1,0	0,8	2,1	0,8	0,6	1,15	1,6	3,7 0,95
$\sigma_{\beta_в}$	0,5	1,0	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,35	0,5	
α	0,9	2,6	0,9	1,1	1,0	1,6	1,2	1,0	1,2	1,0	0,8	1,0	0,6	0,7	1,0	0,8	0,95	1,25	2,2 0,9
σ_α	0,6	0,6	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,4	0,4	0,42	0,48	
θ	1,7	3,5	1,7	1,8	0,9	1,0	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3	1,1	1,1	1,2	1,6	0,5	1,39	1,6	2,44
σ_θ	0,3	0,5	0,2	0,1	0,2	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4	0,2	0,2	0,6	0,8	0,3	0,4	0,31	0,42	0,95

Интересно отметить, что время для отдыха (паузы T между сигналами) при $n = 3$ в опытах больше, чем при $n = 6$. Априорно же казалось, что при $n = 6$ повышенное напряжение оператора при частых сигналах, когда все 6 приборов заняты, должно давать ему возможность больше передохнуть во время пауз.

Соответственно при $n = 3$ вероятность задержки сигналов в системе свыше 30 с (p_1) и свыше 55 с (p_2) меньше, чем при $n = 6$. При $n = 3$ во всех интервалах $p_1 = p_2 = 0$, в то время как при $n = 6$ вероятность p_2 в первом цикле (пропуск сигналов в период врабатывания) велика, а затем p_1 и p_2 повышаются к концу второго часа работы. В табл. 23 приведены средние данные по относительным сдвигам ПФП в процессе работы с $n = 3$ и $n = 6$ при $\Lambda = 0{,}09$. Для проверки полученных результатов была проведена дополнительная серия экспериментов на четырех испытуемых (I—IV) в тех же условиях, но с несколько иным набором регистрируемых показателей. По рекомендации Л. Д. Чайновой в опытах дополнительно регистрировался β-ритм (нижняя $\beta_н$ и верхняя $\beta_в$ частотные полосы). В табл. 24 приведены результаты этой серии со статистической оценкой разности средних значений ПФП.

Результаты, полученные на значительном экспериментальном материале всех описанных серий экспериментов, свидетельствуют о том, что сложность выполнения оператором функций слежения (по показателям эффективности работы и напряженности различных систем человека) зависит от числа одновременно воспринимаемых сигналов. Это подтверждает целесообразность применения предложенного принципа оптимизации потока сигналов, поступающих к человеку-оператору.

Необходимо узнать, не связано ли снижение среднего времени обработки сигналов при $n \neq 3$ с увеличением при этом информационной нагрузки оператора по сравнению с $n = 6$.

Данный эксперимент допускает использование теоретико-информационных мер, поскольку его отличают следующие особенности.

1. Относительная важность показаний всех приборов и отображаемых на них отклонений параметров одинакова.

2. Алгоритмы обработки всех сигналов принципиально не различаются: порядок величин отклонений и динамические свойства регулируемых объектов весьма близки.

3. Все сигналы независимы друг от друга и следуют в случайном порядке.

4. Оператору не требуется привлекать дополнительную (скрытую) информацию для обработки различных сигналов, поскольку они не наделяются содержательной технологической интерпретацией.

5. Значение сигналов не зависит от субъективных особенностей оператора, его опыта и знаний.

Общее количество информации R_0, воспринятой оператором за интервал ΔT, складывается из трех составляющих: 1) инфор-

мации, воспринятой в связи с обработкой сигналов отклонений; 2) информации, воспринятой от незанятых приборов, когда $n_{н} > n_{ф} > 0$; 3) информации, воспринятой от приборов в процессе поиска сигналов в течение паузы, когда $n_{ф} = 0$.

Усредненные экспериментальные данные по паузам в поступлении и обработке сигналов за 20 мин (для сравнения приведены данные для $n = 6$ и $n = 3$):

Показатели		$n = 6$	$n = 3$
Общая длительность пауз, T, с		160	280
Общее число пауз		4	7
Число пауз длительностью	0—30 с	2 (10 и 20)	3 (20; 30 и 15)
	30—60 с	1 (55)	3 (55; 50 и 35)
	свыше 60 с	1 (75)	1 (75)
	$n_{ф}$	4,5	2,5

Определялся средний коэффициент отношения (C) глазодвигательной активности при паузе и при наличии сигнала хотя бы на одном из приборов. Оказалось, что C зависит от длительности паузы. При $T = 0 \div 30$ с $C = 0{,}9$, при $T = 30 \div 60$ с $C = 0{,}7$, при $T = 60 \div 75$ с $C = 0{,}6$. Усредненное по всем паузам для $n = 6$ $C = 0{,}69$.

Во время паузы испытуемый ищет отклонение параметра. При этом же условия ординарности простейшего потока сигналов на одновременно воспринимаемых приборах реально могут отражаться два состояния параметров: все в норме, либо один отклонился.

При фиксации глаз на среднем в горизонтальном ряду приборе оператор видит сразу показания трех приборов, но отклониться может вначале только один параметр. Отсюда $R_{п} = \log_2 4 = 2$ бит при средней частоте $\omega_2 \approx 0{,}9$, обращений в секунду. При $n = 6$ $\overline{R}_0 = 1{,}97$ бит/с.

Оценим иекоторые частные показатели для $n = 6$.

1) Информация, перерабатываемая при устраиеиии одного отклонения параметра,

$R' = R\omega = 15{,}5$ бит.

2) Средияя информациоиная нагрузка оператора при обработке сигналов по шести приборам

$$\overline{R}_{о.\ сигн} = \frac{M\omega I + (T_о - T)(n - n_{эф}) T_1 \omega_1}{T_о - T} = 1{,}8 \text{ бит/с},$$

где $T_о$ — длительность общего интервала опыта.

3) Средняя информациоиная нагрузка оператора во время пауз

$\overline{R}_{о.\ пауз} = \omega_2 R_{п} C = 1{,}25$ бит/с.

4) Максимальная информационная нагрузка оператора иа иаиболее плотиом отрезке, где все приборы заияты ($n_{ф} = 6$),

$$R_{о\ max} = \frac{R\omega M}{T_{min}} = 2{,}5 \text{ бит/с}.$$

 При $n = 3$ $R_о = 1{,}21$ бит/с.

Частные показатели для $n = 3$:

1) $\overline{R} = 9{,}3$ бит на один сигнал;
2) $\overline{R}_{\text{о. сигн}} = 1{,}26$ бит/с;
3) $\overline{R}_{\text{о. пауз}} = 1{,}0$ бит/с;
4) $R_{\text{о max}} = 1{,}3$ бит/с.

Сравнение информационной нагрузки оператора при $n = 6$ и $n = 3$ свидетельствует о том, что специальным подбором параметров системы отображения информации (в данном случае при переходе от $n = 6$ к $n = 3$) можно значительно снизить информационную нагрузку на оператора, понизив при этом среднее время обработки сигналов $[\tau\,(n = 3) < \tau\,(n = 6)]$ и, следовательно, повысив пропускную способность системы в целом.

В данном случае согласование пропускной способности СОИ и человека-оператора достигнуто путем перехода от $n = 6$ к $n = 3$, т. е. за счет использования демпфирующей информационной системы. Это позволило перераспределить во времени задачи, возникающие на объекте, оптимизировать оперативный объем отображения (фактор $K_{7\text{р}}$) и тем самым добиться повышения эффективности деятельности.

Строгое математическое исследование явления повышения пропускной способности системы передачи информации при снабжении ее памятью имеется в работах Р. Л. Добрушина и М. С. Пинскера [48].

Для систем оперативного управления особое значение имеет доказательство Р. Л. Добрушиным и М. С. Пинскером вывода о влиянии памяти на пропускную способность каналов с произвольными пространствами состояний и обратной связью. Для интересующих нас систем это доказательство может быть интерпретировано следующим образом.

Возьмем в качестве примера исследовавшуюся экспериментальную модель системы.

Рассмотрим пропускную способность системы обработки информации, включающей входное устройство предварительной обработки информации СОИ, оператора и пульт управления как выходной элемент.

Пусть X — конечное пространство состояний управляемого объекта. Это допущение приемлемо, поскольку число приборов n и число различимых для оператора значений параметров (при расчете информационной нагрузки нами было принято $N = 7$) ограничены. В свою очередь, $X \leqslant MN$.

Пространство выходных параметров системы Y также конечно и может быть приближенно выражено как произведение числа органов управления n на число типов импульсов, посылаемых оператором, которое соответствует N.

Если устройства предварительной обработки информации имеют память, то вся исследуемая система может быть задана последовательностью переходных функций

$$P_n(y_1, \ldots, y_n \mid x_1, \ldots, x_n), \; y_i \in Y, x_i \in X$$

таких, что

$$P_{n-1}(y_1, \ldots, y_{n-1} \mid x_1, \ldots, x_{n-1}) = \sum_{y_n \in Y} P_n(y_1, \ldots, y_n \mid x_1, \ldots, x_n).$$

По известной теореме Шеннона о кодировании пропускная способность канала может быть задана как

$$C \lim \frac{1}{n} C_n;\ C_n = \operatorname{Sup} I\,[(\eta_1, \ldots, \eta_n),\ (\xi_1, \ldots, \xi_n)], \tag{68}$$

где $I\,[(\eta_1, \ldots, \eta_n), (\xi_1, \ldots, \xi_n)]$ — количество информации; величины $\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_n$ со значениями на множестве X произвольны, а условное распределение $\eta_1, \ldots, \eta_n$ при заданных $\xi_1 = x_1, \ldots, \xi_n = x_n$ задается как $P_n(y_1, \ldots, y_n | x_1, \ldots, x_n)$.

Очевидно, что

$$C_n \geqslant \operatorname{Sup} I\,[(\eta_1, \ldots, \eta_n)(\xi_1, \ldots, \xi_n)], \tag{69}$$

где A включает те случаи, когда, как это было в наших экспериментах, $\xi_1, \ldots, \xi_n$ независимы. Ранее Р. Л. Добрушиным [48] было доказано важное положение, что для независимых $\xi_1, \ldots, \xi_n$

$$I\,[(\eta_1, \ldots, \eta_n)(\xi_1, \ldots, \xi_n)] \geqslant I(\xi_1, \eta_1) + \ldots + I(\xi_n, \eta_n). \tag{70}$$

Для рассматриваемой системы обработки информации может быть принято описание, введенное Вольфовицем:

$$\sum P_n(y_1, \ldots, y_n | x_1, \ldots, x_n) = q_n(y_n | x_n),\ n = 1, 2, \ldots$$

$$y_1 \in Y, \ldots, y_{n-1} \in Y.$$

Если обозначить через C_n пропускную способность канала блока при наличии памяти, а через $\overline{C_n}$ пропускную способность блока без памяти с матрицей

$$\{q_n(y_n | x_n),\ y \in Y, x \in X\},$$

то из выражений (69) и (70) следует применимость теоремы Вольфовица об увеличении пропускной способности канала связи введением памяти:

$$C_n \geqslant \overline{C_1} + \ldots + \overline{C_n}.$$

В необходимых случаях пропускная способность оператора со вспомогательной информационной системой, снабженной устройствами предварительной обработки информации и памятью, может быть еще более повышена за счет воздействия на процессы обработки сигналов оператором путем изменения характеристик СОИ (например, оперативного объема отображения — числа приборов n) по обратной связи в зависимости от состояния и показателей работы оператора.

В целом результаты проведенного исследования подтвердили, что величина оперативного объема отображения является существенным фактором, влияющим на деятельность оператора. Применение систем отображения информации со специальными анализаторами и запоминающими устройствами, предназначенными для оптимизации оперативного объема отображения, позволяет повысить эффективность и снизить напряженность деятельности человека-оператора.

Вместе с тем, учитывая, что деятельность операторов зачастую подвержена воздействию совокупности различных факторов, в частности, условий внешней среды, необходимо выяснить относительную весомость факторов, определяемых способом представления информации, например, величины оперативного объема отображения, по сравнению с факторами внешней среды. Такое комплексное исследование может быть проведено на примере рассматривавшейся здесь деятельности оператора радиотелефонной системы, реально протекающей в большом диапазоне изменения внешних условий.

Глава

7

Психологические проблемы оперативно-адаптивных систем

20

Постановка задачи, методика, условия и ход экспериментов

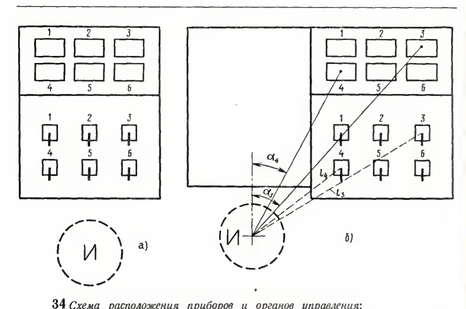
Советскими психологами [3, 74] выдвинуто и обосновано положение о сложном системном механизме восприятия.

Восприятие в процессе слежения носит многомодальный характер: зрительное восприятие показаний приборов, кинестетическое ощущение положения органа управления, отсчет интервалов времени при подаче командного (регулирующего) сигнала без зрительного контроля по прибору.

Необходимо решить вопрос о том, в какой степени изменение окружающих условий влияет на деятельность операторов, в каких случаях факторы внешней среды становятся сопоставимыми по значению с факторами сложности задач, обусловливаемыми характеристиками средств отображения информации, или даже привалирует над последними. В практическом и научном плане решение такого вопроса важно для определения интервалов изменения параметров внешней среды, в которых справедливы те или иные рекомендации по построению систем отображения информации, и для создания теории обширного класса оперативно-адаптивных систем [1].

В качестве примера для изучения влияния факторов внешней среды была взята уже рассматривавшаяся ранее деятель-

[1] Важные аспекты этой теории разрабатываются также В. М. Ахутиным. См. Ахутин В. М. О принципах контроля за организмом человека и автоматической нормализации его состояния. — В кн.: Технические и биологические проблемы управления. М., «Наука», 1970.



34 *Схема расположения приборов и органов управления:*

а — на передней панели; *б* — на боковой (правой) панели; *1—6* — номера приборов и соответствующих им органов управления; *И* — испытуемый

ность оператора радиотелефонной системы. В этом случае кроме изменения числа приборов ($n = 1, 3, 6$) от опыта к опыту изменялись также уровень освещенности пульта ($L = 6{,}65$ и 300 лк), уровень шума в помещении ($H = 45$ и 90 дБ), расположение приборов и органов управления на пульте по отношению к испытуемому: они располагались либо перед ним — на передней панели пульта (рис. 34, *а*), либо на правой боковой панели пульта (рис. 34, *б*). Интенсивность потока сигналов оставалась во всех опытах постоянной — на вход системы подавался пуассоновский поток с постоянной $\Lambda = 0{,}09$ сигн/мин, который, как и ранее, делился на первую ($\lambda_1 = 0{,}05$) и вторую ($\lambda_2 = 0{,}04$) группы с относительным приоритетом первой группы. Вся процедура эксперимента и перечень регистрируемых психофизиологических показателей и параметров эффективности деятельности были аналогичны предыдущей серии (см. п. 18).

Прежде всего необходимо было выяснить, не нарушается ли структура сенсомоторных реакций оператора при изменении окружающих условий; кроме того, требовалось провести сравнение по показателям эффективности и психофизиологическим сдвигам несколько практически возможных вариантов внешних условий работы оператора: 1) размещение пульта радиотелефонной системы рядом с экранами электроннолучевых индикаторов на боковой панели, справа от оператора, в затемненном ($L = 6$ лк) и звукоизолированном помещении ($H = 45$ дБ); 2) размещение пульта в технологическом зале с высоким уров-

нем освещенности ($L = 300$ лк) и шума ($H = 90$ дБ), но в оптимальной зоне перед оператором. Следовало также обосновать необходимость создания для пульта оператора особого отсека (помещения) с оптимальными условиями деятельности. Лабораторные исследования велись в основном для системы с дублированными автоматическими регуляторами, когда оператор включается в работу при отказе основных регуляторов только на 15 мин (среднее время включения резервных блоков регуляторов). Натурные наблюдения включали также анализ деятельности оператора в недублированной системе. Тогда длительность работы оператора составляла 4 ч.

Трудность выбора критерия сравнения вариантов внешних условий деятельности оператора и выбора наилучшего из возможных вариантов определяется прежде всего сложной вероятностной природой влияния условий на протекание его деятельности.

В простейшем случае, при условии нормальности распределений, варианты могут сравниваться по математическому ожиданию. В случае, если дисперсия значений показателя, например U, в сравниваемых случаях велика, то среднее значение этого показателя не может служить достаточно надежным критерием сравнения вариантов, необходимо среднее значение дополнить данными об интервале возможных значений показателя. Ранее [28] нами был предложен комплексный безразмерный критерий сравнения условий деятельности оператора при наличии различий сразу в нескольких факторах внешней среды вида

$$C = \frac{\Delta\overline{U}}{\sigma_U^2} + \varphi\Delta U_{\max},$$

где C — критерий сравнения;
U — сравниваемый показатель;
$\Delta\overline{U}$ — разность средних значений;
$\Delta U_{\max}$ — разность максимальных значений;
φ — весовой коэффициент разности максимальных (минимальных) значений показателя;
σ_U^2 — дисперсия показателя U.

Если из экспериментов получена достаточно большая выборка значений показателя U для построения эмпирической кривой распределения, то сравнение вариантов условий может производиться графо-аналитическим способом. Задаваясь на основе анализа динамики и технологии объекта разными уровнями показателя U, как оценками деятельности оператора, например, менее U_1 — «отлично», в интервале $U_1 — U_2$ «хорошо», в интервале $U_2 — U_3$ «удовлетворительно» и более U_3 — «неудовлетворительно», планиметрируя кривые распределения в интервалах $0—U_1$, $U_1—U_2$ и т. д. и сравнивая доли площадей под кривыми распределения в этих интервалах, можно

Переменные условия опытов (факторы)

$\Lambda(\lambda_1, \lambda_2)$

n

t

L

H

МР

Показатели эффективности и напряженности деятельности

$\tau_{1,2}$

$\omega_{1,2}$

$p\{\omega_1 > 0\}$

$p\{\omega_{1,2} > \omega^*\}$

I

ЭЭГ – α

ЭЭГ – $\beta_н$

ЭЭГ – $\beta_в$

ЭЭГ – θ

$ЭОГ_{г,в}$

ЭКГ

КГР

35 *Параметры условий протекания деятельности оператора (контролируемые факторы) и ее показатели*

Средние значения показателей

№ опыта	Условия опыта				τ, с	
	n	*MP*	*L*, лк	*H*, дБ	τ	σ_τ
1	6	Прямо	6	45	55,1	23,6
2	3		6	45	34	16,6
3	3		6	45	17,4	16,3
4	1		6	45	12,6	8,7
5	6		300	45	50	29,2
6	3		300	45	30,7	19,9
7	6	Справа	65	45	67,4	47,4
8	3		65	45	42,5	31,1
9	6		300	45	62,7	45,8
10	3		300	45	42,2	19,8
11	6		6	45	65	42,8
12	3		6	45	57,8	38,8
13	3	Прямо	300	90	48	38,8
14	3		65	90	54	15
15	3		6	90	42	13
16	6		300	90	54	20
17	6		6	90	28	18
18	6		65	90	50	13

получить соотношения вероятностей отличных, хороших, удовлетворительных и неудовлетворительных исходов и значений показателя *U* в сравниваемых вариантах условий деятельности оператора.

В лабораторных экспериментах изучался процесс регулирования оператором сигналов при перечисленных в табл. 25 вариантах условий.

Из табл. 25 видно, что в экспериментах не ставилась задача полного многофакторного исследования данной операторской деятельности. Поэтому специально не разрабатывался план экспериментального исследования (планирование факторных экспериментов подробно рассмотрено в работах Г. К. Круга, В. В. Налимова, Ч. Р. Хикса и др.). Нас интересовало, наблюдаются ли существенно нелинейные сдвиги в процессах регули-

деятельности оператора в экспериментах

$n_ф$		I, в		ЭКГ		ЭОГ				ЭЭГ-θ		ЭЭГ-α	
$n_ф$	$\sigma_{n_ф}$	I	σ_I	ЭКГ	$\sigma_{ЭКГ}$	$ЭОГ_д$	$\sigma_{ЭОГ_д}$	$ЭОГ_и$	$\sigma_{ЭОГ_и}$	θ	σ_θ	α	σ_α
4,6	1,6	66	21	1,11	0,05	1,17	0,1			1,08	0,08	1,0	2,42
2,5	0,69	71	16	0,95	0,1	1,1	0,14			1,24	0,1	1,6	0,68
0,9	0,87	18	13,4	1,03	0,17	0,93	0,14			0,91	0,45	1,6	0,75
0,5	0,37	27	11,3	1,2	0,1	1,2	0,38			1,4	0,7	1,97	0,67
4,4	2,1	55	26	1,15	0,07	0,77	0,17	0,14	0,12	1,7	0,44	2,17	0,6
2,4	0,8	35	20	1,13	0,07	1,09	0,13	0,73	0,42	1,2	0,58	29	0,20
4,8	0,7	96	40,2	1,2	0,07	3,2	0,9			1,7	0,45	1,0	0,4
2,9	0,38	62	38,4	1,16	0,06	2,19	0,47	1,2	0,30	1,7	1,2	1,4	0,4
4,5	1,0	85	31,3	1,54	0,1	1,48	0,24	1,17	0,3	2,5	1,0	2,5	0,8
2,8	0,33	70	26	1,03	0,03	1,27	0,16	0,64	0,09	2,35	0,26	2,8	0,33
4,9	0,71	98	42	1,15	0,05	1,24	0,2	0,65	0,14	3,2	1,0	0,6	0,8
2,9	0,31	60	26	1,05	0,05	1,12	0,11	0,73	0,22	0,96	0,23	1,1	0,27
2,1	1,0	74	21	1,07	0,07	1,97	0,26			3,8	1,2	1,4	0,5
2,1	1,0	87	8,2	1,16	0,05	1,12	0,13			4,1	1,6	1,2	0,5
2,6	1,03	80	20,8	1,12	0,02	1,27	0,22			5,6	2,1	0,7	0,3
4,4	1,7	80	23,1	0,98	0,03	1,09	0,18			5,3	2,0	1,2	0,45
3,8	1,05	45	20,9	1,04	0,05	1,3	0,18			6,9	2,4	0,5	0,5
3,9	0,78	90	13,8	1,18	0,12	0,86	0,07			5,5	2,35	0,9	0,4

рования параметров оператором при изменении окружающих условий, другими словами, как сказывается изменение этих условий на структуре сенсомоторных реакций.

Из методов проведения факторных экспериментов был заимствован принцип рандомизации, заключающийся в использовании случайной последовательности в переходе от одних условий экспериментов к другим.

Перечни факторов и показателей, приведенные на рис. 35, могут служить отправной точкой для статистического многофакторного исследования данного вида деятельности. Заполнение прямоугольника частными и множественными статистическими связями между факторами и показателями позволило бы получить структуру факторной статистической модели этой деятельности. В нашей работе такая задача не ставилась.

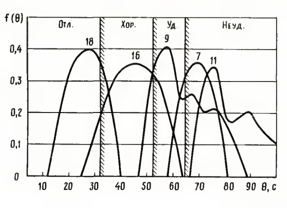
21 Результаты экспериментов и методологические проблемы комплексного учета условий деятельности

Средние значения показателей и их среднеквадратические отклонения по всем опытам приведены в табл. 25 и 26. Примеры распределений показателей приведены на рис. 36. Результаты экспериментов обработаны на ЭВМ БЭСМ-6 по ранее описанной специальной программе.

На основе данных табл. 25 и 26 можно составить ряд из вариантов примененных экспериментальных условий по убыванию (или возрастанию) какого-либо показателя. Например, по показателю времени обработки сигналов (в порядке возрастания) условия выстраиваются в следующий ряд (по номерам табл. 25): 4, 17, 3, 5, 14, 13, 18, 16, 6, 2, 10, 8, 5, 1, 12, 9, 11, 7. На рис. 36 указаны границы интервалов оценки показателей деятельности («отлично» и др.), по которым могут рассчитываться вероятности значений показателей и их оценок при разных условиях деятельности.

Прежде всего бросается в глаза тот факт, что минимальное среднее время обработки сигналов (для потока $\lambda = 0{,}09$ сигналов в минуту) $\bar{\tau}_{17} = 28$ с показано в 17-м опыте при весьма неблагоприятных условиях деятельности: $n = 6$, $L = 6$ лк, $H = 90$ дБ. В этом опыте достаточно высок и показатель качества процессов регулирования: $\bar{I}_{17} = 45$. Считать такие условия наиболее благоприятными, несмотря на хорошие показатели эффективности деятельности, безусловно нельзя. О высокой напряженности деятельности в этом опыте свидетельствуют величины сдвигов психофизиологических показателей (ПФП): значительная активизация θ-ритма и подавление α-ритма ЭЭГ. В этих условиях следовало ожидать увеличения латентного периода зрительно-моторной реакции вследствие пониженной освещенности, как показал это в своей работе В. И. Шостак [1], и снижения остроты зрения из-за отрицательного влияния шума, как установили С. В. Кравков и А. И. Богословский, что должно было дополнительно замедлить сенсомоторную реакцию. Данные нашего опыта противоречат выводам указанных исследований. Парадоксальный результат этого опыта по показателям эффективности, видимо, свидетельствует о включении (произвольном или непроизвольном) в процессе деятельности оператора при неблагоприятных условиях особого механизма мобилизации и более сложных межанализаторных связях.

[1] **Шостак В. И.** Функциональное состояние организма в условиях пониженной освещенности. — «Военно-медицинский журнал», 1970, № 3, с. 37—41.



36 *Распределение времени пребывания сигналов на приборах при разных внешних условиях (метод сравнения вариантов по площадям)*

Таблица 26

Средние показатели по группам условий

Условия опыта		Показатели					
		τ, с	I, В	ЭКГ	ЭОГ$_д$	ЭЭГ-θ	ЭЭГ-α
Число приборов	3	42,7	67,3	1,08	1,39	2,61	1,6
	6	54,02	76	1,16	1,38	3,48	1,23
Место расположения приборов	Прямо	38,9	62	1,64	1,15	3,22	1,42
	Справа	56,2	78	1,18	1,7	2,06	1,5
Освещенность, лк	6	38,9	58,1	1,08	1,16	2,66	1,13
	65	51,2	83,7	1,1	1,84	2,7	1,12
	300	47,9	66,5	1,15	1,27	2,8	2,16
Уровень шума, дБ	45	44,7	61,9	1,14	1,39	1,66	1,72
	90	44,5	76	1,09	1,26	5,2	0,98

Подобное явление обнаружено нами также при детальном анализе процессов регулирования в опыте № 11. Кривая распределения времени обработки испытуемым сигналов в этом опыте имеет 3 горба, т. е. фактически это композиция трех распределений. Причем в распределение с наименьшими значениями попало большинство данных по обработке сигналов, поступивших на прибор № 3. На рис. 34, *б* видно, что прибор № 3 воспринимается под наибольшим углом зрения $\alpha_3 = 65°$, в то время как $\alpha_1 \approx \alpha_4 = 38°$. Подавление α-ритма ЭЭГ в этом случае в среднем за опыт выражено меньше, чем в опыте № 17, поэтому можно предположить, что мобилизация в этом случае

носит избирательный характер: испытуемый выбирает в данных условиях прибор № 3 как наиболее трудный, уделяет ему наибольшее внимание и решает задачу регулирования сигналов на этом приборе как субъективно главную.

В результате получилось, что на этом приборе было отработано больше сигналов и более качественно, чем на любом другом, в том числе расположенных ближе к оптимальной зоне обзора — первом, втором и четвертом. Отсюда следует, что если более важные, аварийные сигналы подавались бы в данном случае на приборы № 1, 2, 4, 5, а второстепенные — на расположенные на периферии приборы № 3, 6, как это рекомендуется во всех справочниках [73, 116], то система потерпела бы существенный ущерб по сравнению с тем случаем, если бы был осуществлен текущий контроль за эффективностью обработки оператором сигналов, поступающих на разные приборы, и сигналы различной важности распределялись бы между приборами с учетом этих данных, либо необходимо было бы обеспечить дополнительный привлекающий эффект к тем приборам, на которые поданы более экстренные сигналы. Важно констатировать, что самое расположение разных приборов в оптимальной и пессимальной зонах не всегда однозначно определяет соотношение эффективности их восприятия, а также скорости и точности сенсомоторных реакций на сигналы, поступающие на эти приборы.

Сложный характер влияния изменения параметров внешних условий на показатели изучаемой деятельности дает основание предполагать, что существуют достаточно сложные статистические зависимости и между отдельными показателями.

В табл. 27 и 28 представлены коэффициенты парной корреляции между показателями τ, I и $n_ф$ и всеми остальными.

Достаточно велики по абсолютной величине средние значения коэффициентов взаимной корреляции показателей эффективности:

$$|r_{\tau-I}| = 0{,}43; \quad |\tau_{\tau-n_ф}| = 0{,}44.$$

Характерна динамика корреляции показателей эффективности и ПФП при изменении условий деятельности. Если деятельность протекает в условиях сенсорного комфорта ($L = 300$ лк, $H = 45$ дБ), наблюдается высокая коррелированность скорости обработки сигналов с частотой пульса: скорость обработки, особенно при большом числе одновременно отображенных сигналов ($n = 6$), в основном определяется интенсивностью моторных реакций, темпом двигательной работы. Например, в опыте № 5 $r_{\tau\text{-ЭКГ}} = 0{,}71$; в № 16 $r_{\tau\text{-ЭКГ}} = 0{,}86$; в № 9 $r_{\tau\text{-ЭКГ}} = 0{,}57$.

Напротив, в условиях сенсорного дискомфорта ($L = 6$ лк, $H = 90$ дБ) скорость обработки сигналов более тесно связана статистически с такими психофизиологическими показателями напряженности центральной нервной системы, как α и θ-ритмы ЭЭГ (см. опыты № 15, 17, 18 в табл. 27).

Коэффициенты корреляции τ с I, $n_ф$ и ПФП

№ по пор.	n	L, лк	Λ	H, дБ	MP	$r_{\tau-I}$	$r_{\tau-n_ф}$	$r_{\tau-ЭКГ}$	$r_{\tau\text{-ЭОГ}}$		$r_{\tau-\alpha}$	$r_{\tau-\theta}$
									$Д$	$И$		
1	6	6	0,09	45	Прямо	—	0,18	—0,28	0,23	—	0,29	0
2	3	6	0,09	45		0,24	0,38	0,48	—	—	0,37	0,15
3	3	6	0,04	45		0,69	0,8	—0,11	—0,24	—	0	0
4	1	6	0,04	45		—	0,77	0,29	0,10	—	0,25	—0,26
5	6	300	0,09	45		0,57	0,67	0,71	—	—	0,45	0,63
6	3	300	0,09	45		—	0,23	—0,26	—	—0,29	0	0,20
7	6	65	0,09	45	Справа	—	0,23	0,14	—	—	0,23	0,16
8	3	65	0,09	45		—	0,37	0,34	0,40	—	0	0
9	6	300	0,09	45		—	0,35	0,57	—	+0,49	0	0
10	3	300	0,09	45		—	0,37	0,21	0,17	+0,31	0	0
11	6	6	0,09	45		—	0,42	—0,10	0,28	—	—0,15	—0,31
12	3	6	0,09	45		0,38	0,19	0,44	—0,12	—0,12	0,22	0,29
13	3	300	0,09	90	Прямо	—0,27	0,25	0,36	—	—	0,27	0,32
14	3	65	0,09	90		—	0,65	0,42	0,49	—	0,2	0,42
15	3	6	0,09	90		0,47	0,24	0,11	—	—	—0,52	—0,56
16	6	300	0,09	90		—	0,81	0,86	0,50	—	—0,44	0,38
17	6	6	0,09	90		—	—	—0,13	—	—	—0,53	0,8
18	6	65	0,09	90		—	0,59	—0,38	0,25	—	—0,32	0,62
Средние значения						0,43	0,44	0,34	0,3	0,3	0,23	0,28

На рис. 37 представлены зависимости различных показателей деятельности человека от отдельных факторов окружающих условий. Здесь сравниваются результаты экспериментов, условия которых различались значением только одного фактора: освещенности L (рис. 37, *а* и *е*) числа приборов n (рис. 37, *б* и *в*), шума H (рис. 37, *г*) или места расположения MP приборов и органов управления (рис. 37, *д*).

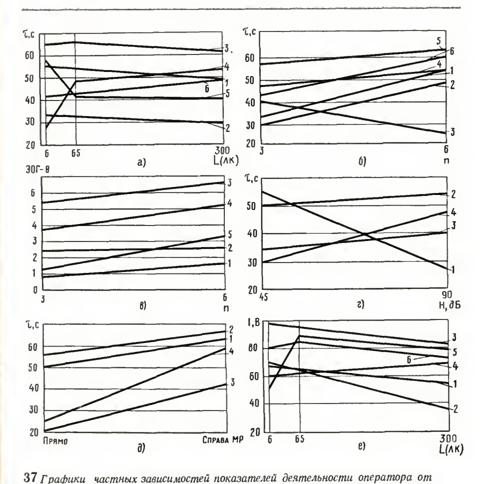
Увеличение числа приборов с 3 до 6, как правило, приводит к увеличению среднего времени τ обработки сигналов (рис. 37, *г*), некоторому ухудшению качества I процессов регулирования (рис. 37, *д*) с одновременным повышением напряжения зрительного анализатора (подавлением α-ритма ЭЭГ). Аналогичное

Коэффициенты корреляции *I* с $n_ф$ и ПФП

№ по пор.	*n*	*L*, лк	Δ	*H*, дБ	*MP*	$r_{I-n_ф}$	$r_{I\text{-ЭКГ}}$	$r_{I\text{-ЭОГ}}$		$r_{I-\alpha}$	$r_{I-\theta}$
								Д	*И*		
1	6	6	0,09	45	Прямо	0,49	—	—	—	—	—
2	3	6	0,09	45		0,66	0,23	—	—	0,54	0
3	3	6	0,04	45		0,84	—0,50	0	—	0,26	0,54
4	1	6	0,04	45		0	0	—0,24	—	0	—0,26
5	6	300	0,09	45		0,7	0,67	0	0,14	0,44	0,42
6	3	300	0,09	45		0,56	0,13	0	—0,54	0	—0,16
7	6	65	0,09	45	Справа	0	—	—	—	—	—
8	3	65	0,09	45		0	—	—	—	—	—
9	6	300	0,09	45		0	—	—	—	—	—
10	3	300	0,09	45		0,41	0	0	—0,20	0,25	0,30
11	6	6	0,09	45		0	—	—	—	—	—
12	3	6	0,09	45		0,31	0,54	—0,37	—0,24	0	0,24
13	3	300	0,09	90	Прямо	0,4	0,52	0,67	—	—	—
14	3	65	0,09	90		0	0	—0,16	—	—	—
15	3	6	0,09	90		0,35	0,11	0,18	—	—	—
16	6	300	0,09	90		0,7	0,53	0,62	—	—	—
17	6	6	0,09	90		0,78	0,75	—0,17	—	—	—
18	6	65	0,09	90		0,29	0,35	0,35	—	—	—
Средние значения						0,36	0,33	0,21	0,28	0,21	0,27

влияние на τ и *I* оказывает снижение уровня освещенности (от 300 до 65 и далее до 6 лк), повышение уровня шума (с 45 до 90 дБ), перенос приборов с передней на боковую панель. На фоне этих естественных закономерностей особенно резко бросается в глаза парадокс, выявившийся в опыте № 17 ($n = 6$, $L = 6$ лк, $H = 90$ дБ), отраженный в обратном наклоне линии *3* на рис. 37, *б* и *г*, линии *1* на рис. 37, *г*.

Нарушение общей закономерности в этом опыте может рассматриваться как следствие нелинейного воздействия комбинаций факторов на деятельность человека и свидетельствует о необходимости специального изучения его деятельности в особо неблагоприятных условиях (например, как здесь, околопороговые условия зрительного восприятия с одновременным воздействием шума) и неправомерности линейной экстраполяции за-



37 *Графики частных зависимостей показателей деятельности оператора от отдельных факторов окружающих условий. Обозначения условий опытов*:

на графиках *а* и *е*: *1* — $n = 6$; $H = 45$; *2* — $n = 3$, $H = 45$; *3* — $n = 6$, $H = 45$, панель справа; *4* — $n = 3$, $H = 45$, панель справа; *5* — $n = 6$, $H = 90$; *6* — $n = 3$, $H = 90$; на графиках *б* и *в*: *1* — $L = 6$; $H = 45$; *2* — $L = 300$, $H = 45$, *3* — $L = 6$; $H = 90$; *4* — $L = 6$; $H = 45$, панель справа; *5* — $L = 300$, $H = 90$; *6* — $L = 300$, $H = 45$, панель справа; на графике *г*: *1* — $n = 6$, $L = 6$; *2* — $n = 6$, $L = 300$; *3* — $n = 3$; $L = 6$; *4* — $n = 3$, $L = 300$; на графике *д*: *1* — $n = 6$, $L = 300$; $H = 45$; *2* — $n = 6$; $L = 6$, $H = 45$; *3* — $n = 3$, $L = 300$, $H = 45$; *4* — $n = 3$, $L = 6$, $H = 45$

кономерностей, установленных для нормальных условий, в особые условия деятельности.

Во всех случаях при переходе от 3 к 6 приборам повышалась интенсивность θ-ритма ЭЭГ. Поскольку интегральное значение θ-ритма считается показателем уровня нервно-психической напряженности организма человека, повышение активности θ-ритма при одновременном ухудшении средних показателей эффективности (см. табл. 25, 26) в опытах при $n = 6$ по сравне-

нию с $n = 3$ свидетельствует о необходимости специального определения и установки оптимального для данных условий деятельности человека числа приборов, на которых одновременно отображаются сигналы.

Для всех групп условий рассчитаны средние показатели (см. табл. 26), а для некоторых из них ($L = 6$ лк, 300 лк, 64 лк, $H = 90$ дБ при $n = 3$) построены эмпирические кривые распределений (см. рис. 36), позволяющие выбрать из данного ряда вариантов наилучший по показателю времени пребывания сигналов на приборе (обработки оператором) с учетом одного из перечисленных выше критериев сравнения.

Распределения времени обработки сигналов оператором, полученные из анализа деятельности операторов непосредственно на объекте в течение четырехчасовой смены, показали, что при длительной работе шум 90 дБ является решающим отрицательным фактором: кривые распределений большей частью лежат в зоне неудовлетворительных значений времени обработки.

Тот факт, что та часть сигналов, которая в некоторых опытах пришлась на удаленный 3-й прибор, была отработана оператором лучше, чем остальные, дополнительно указывает на значительные возможности улучшения эффективности оперативного управления, которые может дать контроль за деятельностью оператора и учет ее показателей при регулировании потока сигналов, его распределении по отдельным информационным элементам, в том числе, например, по приборам, расположенным на щите или приставке к пульту.

Исследования, описанные в этом разделе, проведенные в условиях реального объекта и в лаборатории, выявили существенное влияние темпа подачи информации и оперативного объема отображения на эффективность деятельности человека и сдвиги психофизиологических показателей.

В связи с этим выдвинута проблема регулирования интенсивности потока сигналов, поступающих к оператору.

Разработан принцип регулирования оперативного объема отображения. Для конкретного вида деятельности человека-оператора экспериментально определено оптимальное значение этого информационного фактора сложности задач, которое обеспечивает максимум эффективности деятельности и минимум сдвигов психофизиологических показателей.

Предложена математическая модель, приближенно аналитически описывающая систему с регулируемым объемом отображения. Для исследования особо сложной реальной системы применен метод статистического моделирования на ЭЦВМ.

Исследуя информационные факторы сложности оперативных задач, такие как число воспринимаемых человеком приборов, частота следования сигналов, динамика изменения регулируемых параметров и т. п., важно помнить указание Б. Ф. Ломова о том, что определяя оптимальный способ сигнализации об управляемых объектах, необходимо по возможности учитывать

всю систему раздражителей, действующих на все анализаторы человека. Это требование особенно важно подчеркнуть в связи с тем, что условия труда человека в современном производстве чрезвычайно разнообразны [76, 78]. В соответствии с этим в число контролируемых в экспериментах факторов сложности оперативных задач были включены условия внешней среды (освещенность, шум), положение человека за пультом. Отметим ряд конкретных выводов этих исследований.

1. Восприятие и сенсомоторные реакции в процессе регулирования параметров, отображенных на нескольких приборах, имеют сложную многомодальную структуру. В основу их изучения может быть положена гипотеза о сложном, системном механизме многомодального восприятия пространства и связанных с ним сенсомоторных рефлексов [3, 74]. Так же как и для процесса обучения восприятию пространства, основными предпосылками обучения визуальному контролю и регулированию параметров по приборам являются накопление множества конкретных знаний о реальных объектах и специализация пространственных признаков (визуальных, моторных) отдельных объектов и пространственных отношений между ними.

Дополнительным подтверждением системного механизма интермодальных сенсомоторных реакций является выявленный в экспериментах сложный, нелинейный характер влияния совокупности изменяющихся факторов внешней среды на деятельность человека при регулировании параметров по приборам.

Нелинейность проявилась, в частности, в повышении эффективности деятельности (малые значения θ и I) и увеличении уровня психофизиологических реакций (повышение активности θ-ритма и подавление α-ритма ЭЭГ) в опыте с одновременным действием нескольких отрицательных факторов ($L = 6$ лк, $H = 90$ дБ).

Другой пример сложного влияния факторов внешней среды на изучавшуюся деятельность — лучшие показатели регулирования, достигнутые в одном из опытов, по прибору, который воспринимался в особо затрудненных условиях (низкая освещенность и большой угол зрения).

2. Сложная структура деятельности операторов обусловливает, как правило, значительный разброс экспериментальных данных. Вследствие этого в качестве критериев сравнения вариантов условий работы оператора наряду с простейшим сравнением средних арифметических значений показателей должны использоваться критерии, учитывающие дисперсию данных и разность максимальных (или минимальных) значений. Весьма полезно также непосредственное сравнение распределений значений показателей (с оценками разных интервалов значений показателей) и анализ корреляционных зависимостей между показателями для выбора наиболее представительных из них.

С применением некоторых из перечисленных критериев на основе данных экспериментов и наблюдений проведено

сравнение нескольких практически возможных вариантов условий деятельности операторов.

3. Эксперименты показали, что наряду со способом представления информации (например, при переходе от трех к шести приборам) изменения внешних условий деятельности существенно сказываются как на эффективности деятельности, так и на величине сдвигов психофизиологических показателей.

4. Исследования показали, что изменяя характеристики системы отображения информации, в частности, оптимизируя число приборов, на которые поступают сигналы, можно частично компенсировать неблагоприятные воздействия внешних условий, повышать эффективность деятельности оператора, снижать ее напряженность. Эти результаты подтверждают перспективность практического использования принципа регулирования интенсивности потока сигналов, поступающих к оператору, построения информационно-демпфирующих систем из класса информационно-адаптивных. В дальнейшем возможен переход к системам с широким приспособлением технических средств управления и условий деятельности к конкретному состоянию и психофизиологическим особенностям человека-оператора, т. е. к оперативно-адаптивным системам.

В целом данное исследование подтвердило общие положения о сложной системной природе механизмов многомодального восприятия и сопутствующих ему сенсомоторных реакций.

Универсальность этого положения служит дополнительным стимулом к переходу от изолированного изучения отдельных элементов деятельности к изучению деятельности как целостного явления, на необходимость которого указывали В. М. Бехтерев, В. Н. Мясищев, Б. Г. Ананьев, а позднее Б. Ф. Ломов, К. К. Платонов, В. Ф. Рубахин и другие советские ученые.

Решение такой сложной и весьма ответственной научно-практической задачи может быть возложено, в частности, на эргономику. Именно в этом направлении, очевидно, должна развиваться в дальнейшем эта наука.

Далее мы остановимся более подробно на обсуждении некоторых вопросов, касающихся перспективных задач и методов эргономических исследований трудовой деятельности как сложного целостного явления. Рассматриваемый подход справедлив не только для труда операторов, но и для деятельности в широком смысле этого психологического понятия [1].

В настоящее время наметился качественный скачок в развитии эргономики — переход от накопления многочисленных, зачастую весьма разрозненных фактов и данных об отдельных сторонах и условиях протекания человеческой деятельности, позволяющих в лучшем случае лишь *корректировать* частности, к созданию целостной теории *проектирования* деятельности,

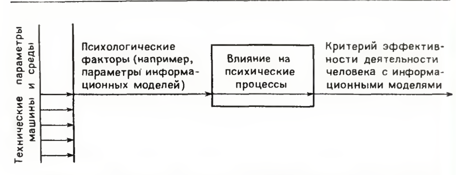
[1] См. **Леонтьев А. Н.** Проблема деятельности в психологии. — «Вопросы философии», 1972, № 9, с. 95—109.

которая позволила бы провести строгую ревизию и классификацию накопленных эргономикой фактов и гармонично объединить их в стройный и логичный научно-методический комплекс [85].

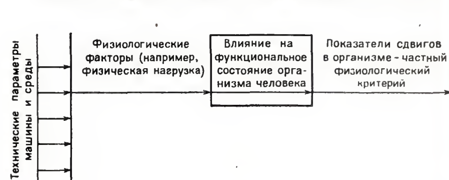
В соответствии с указанными различиями В. П. Зинченко и В. М. Мунипов предложили подразделять эргономику на *коррективную* и *проективную*. Некоторые аспекты методологии проективной эргономики изложены в [21, 28].

Следует сразу оговориться, что коррективная эргономика — это все то, что понимается сейчас во всех странах под термином «эргономика». Ее отличительной чертой является всестороннее изучение деятельности человека и условий ее протекания, при котором, однако, все стороны и факторы рассматриваются независимо друг от друга. В результате отдельно формулируются антропометрические требования к рабочим местам, сиденьям, инструменту, гигиенические требования к окружающей среде, психологические требования к информационным моделям и т. д. Такое положение сложилось исторически. В ответ на требования практики незамедлительно дать ответы на многочисленные вопросы, возникавшие в процессе проектирования сложных современных агрегатов, станков, систем управления, специалисты по «человеческим факторам» — инженерные психологи, физиологи труда, промышленные гигиенисты, антропологи — объединялись в комплексные коллективы, выпускали совместные отчеты, сборники требований, монографии, справочники. Однако каждый писал свой раздел, в котором абсолютизировались, т. е. рассматривались как главные и независимые те или иные группы факторов (гигиенические, физиологические или психологические), а остальные «выносились за скобку» и описывались другими авторами. Ничего не менялось и в том случае, если автор был один: факторы рассматривались все так же автономно, т. е. раздельно и независимо друг от друга. Примеры таких одномерных моделей деятельности приведены на рис. 38 и 39. При этом требования психологии восприятия к визуальным и акустическим информационным средствам не связывались с рекомендациями физиологии по оптимальным рабочим позам, движениям и режимам труда или с данными промышленной гигиены о влиянии производственного шума, вибрации, освещения, микроклимата на состояние организма человека.

Редкое исключение составили такие комплексные работы, как изучение особенностей восприятия показаний приборов и двигательных реакций человека при действии перегрузок в летательном аппарате и некоторые другие, посвященные, как правило, изучению экстремальных (особенно сложных и ответственных) видов и условий деятельности. При этом было, в частности, установлено, что на восприятие показаний прибора влияют не только «чистые» инженерно-психологические факторы — тип прибора, форма и оцифровка шкалы, положение



38 *Частная инженерно-психологическая модель деятельности оператора*



39 *Частная физиологическая модель деятельности оператора*

прибора относительно пилота, но и многие другие, не входящие в сферу психологического изучения деятельиости. Все эти факторы сложиым образом взаимодействуют между собой, оказывая иекоторое результирующее влияиие иа протекание деятельности человека. Подход же, приинятый в коррективиой эргономике, предполагает в каждом случае рассмотрение и оптимизацию деятельиости поочередио по отдельным типам факторов: психологическому (тогда зиачение характеристик аитропометрического, физиологического и гигиенического факторов либо считается оптимальным, либо не учитывается вообще), физиологическому, гигиеиическому и т. д. (с теми же оговорками). В завершеиие производится простое суммирование таких частиых даииых. Коррективио-эргоиомическая модель деятельности оператора схематически показаиа на рис. 40. Несоответствие подобной суммы идеализироваииых одиомерных (по числу видов факторов) моделей реальиым условиям протекания деятельиости, где все факторы тесио взаимосвязаны, очевидио. Методология коррективиой эргоиомики, развитая в работах зарубежиых осиовоположииков эргономики К. Ф. Маррела, Дж. Бюргера, Ж. М. Фавержа и др., в зиачительиой мере ориеи-



40 *Схема коррективно-эргономической модели деятельности оператора*

тирует на раздельное независимое рассмотрение различных сторон и элементов условий труда.

Если бы эргономике не отводилась роль научной основы комплексного проектирования реальной деятельности, то такая идеализация, широко принятая в научных исследованиях вообще, была бы не только допустимой, но и закономерной, поскольку она позволяет добиваться особой строгости и сокращать сроки исследований отдельных интересующих каждую из этих наук сторон деятельности. Однако дело как раз тем и осложняется, что модель деятельности, изучаемая и проектируемая эргономистами, должна быть адекватна той реальной деятельности, для которой в дальнейшем разработчики и конструкторы создают комплекс оборудования и среду. Степень такой адекватности, очевидно, определяет практическую ценность результатов конкретных эргономических исследований.

Следует указать, что в реальных условиях протекания деятельности вполне возможно некоторое несовпадение общего оптимума организации деятельности с частными оптимумами отдельных ее элементов и характеристик. Однако такое несовпадение будет тем меньше, чем более существенные и важные

факторы, влияющие на деятельность, подвергаются корректированию. Например, для труда, связанного с принятием ответственных решений, таковыми являются психологические факторы, для тяжелой физической работы — физиологические факторы для любой деятельности, протекающие в условиях значительных перегрузок, вибраций или в атмосфере сильно загрязненной вредными примесями или отравляющими веществами; первостепенными, обязательными и независимыми всегда оказываются гигиенические факторы жизнеобеспечения.

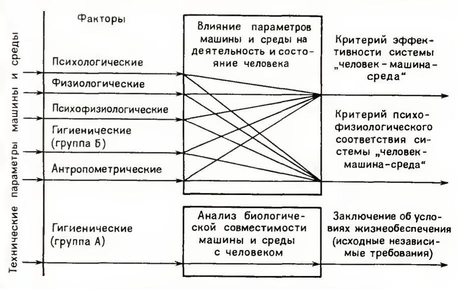
Многие современные виды труда более всего соответствуют первому из приведенных случаев. Вследствие этого самая значительная доля в арсенале рекомендаций и требований коррективной эргономики относится к психологическим факторам деятельности. Эта часть целиком заимствована из инженерной психологии (как в отношении результатов, так и методов исследования), являющейся главной питательной средой коррективной эргономики. Другие части коррективной эргономики заимствованы (или даже совпадают с этими науками по объекту исследований) из физиологии, гигиены, антропологии. Этими обстоятельствами объясняется широко распространенное мнение о том, что эргономика есть сумма ряда наук о трудовой деятельности. Однако, это справедливо лишь для современного состояния эргономики, точнее для коррективной эргономики.

И все же, несмотря на частный характер, разобщенность, несогласованность, а иногда и вытекающую отсюда противоречивость и ошибочность рекомендаций, коррективная эргономика сыграла немаловажную роль, объединив вокруг важных и актуальных проблем различных специалистов и сделав попытку суммировать (хотя порой механически) факты, добытые многими науками о труде. Нельзя не признать, что коррективная эргономика как необходимая начальная фактологическая стадия этой науки оказала определенное положительное влияние на практику проектирования, на темпы накопления дополнительных частных фактов о труде.

Развивающейся на базе коррективной эргономики проективной эргономике (фактически собственно эргономике как науке) можно дать следующее определение.

Проективная эргономика — наука об оптимальной организации деятельности в системах «человек—машина—среда».

Комплексные критерии оптимальности, используемые в проективной эргономике, отражают степень эффективности системы (производительность, точность, надежность) и ее гуманности, соответствия психофизиологии человека (безопасность для здоровья, уровень напряженности и утомления человека, эмоциональное воздействие на него процесса труда). Критерии учитывают взаимосвязанное влияние на деятельность человека психологических, физиологических, антропометрических и гигиенических факторов, определяемых соответствующими параметрами машины и среды. Например, под пси-



41 *Схема проективно-эргономической модели деятельности оператора*

хологическими и физиологическими факторами понимается воздействие конструктивных, эксплуатационных и других технических (в том числе физических, химических и пр.) характеристик рабочих помещений и оборудования соответственно на психические процессы человека и на функциональное состояние его организма. Необходимо особо подчеркнуть специфику собственного предмета проективной эргономики, состоящую в комплексном, целостном изучении деятельности человека.

При этом проектировщики должны получить научно обоснованный инструмент проектирования наиболее оптимальных из всех реально осуществимых вариантов систем «человек—машина—среда».

Каково же должно быть соотношение между проективной эргономикой и другими науками о труде? Этот вопрос может быть решен на основе анализа и соотнесения круга факторов изучаемых каждой из этих наук и учитываемых в применяемых ими критериях. В проективно-эргономических критериях учитываются психологические, физиологические и другие факторы. Следовательно, эргономика является более общей дисциплиной, чем инженерная психология, физиология труда, гигиена, антропометрия. Однако эти критерии связаны между собой весьма сложной зависимостью, так что из положения, что одна наука оперирует более частными критериями, чем другая, вовсе не следует, что первая входит в состав второй. Переход от частных критериев к более общим резко меняет предмет, задачи, область и методы исследования.

Из этого также следует, что эргономика не может заменить собой другие науки о труде, тщательно и глубоко изучающие отдельные его стороны и факторы. В некоторых частных случаях, применительно к отдельным видам деятельности, задачи и методы эргономики могут быть сведены к однофакторным и, таким образом, совпасть с задачами и методами более частных наук, например, инженерной психологии, если осуществляется рационализация деятельности человека с информационными моделями и учитывается только психологический фактор как наиболее существенный. Точно так же задачи и методы технической эстетики — науки более общей, чем эргономика, — могут иногда совпадать с эргономическими, если прочие частные технико-эстетические факторы (эстетические, социологические) почему-либо стабилизированы и оптимизация ведется только по эргономическим характеристикам. Однако все это лишь частные случаи. В целом каждая из этих наук имеет свой круг задач и методов, хотя и широко использует достижения смежных наук, что приводит к их взаимному обогащению [28].

В результате эргономических исследований должны создаваться многомерные модели деятельности (рис. 41), которые качественно и количественно отражают влияние различных факторов и составляющих их отдельных параметров на протекание деятельности.

Модель должна позволять выбирать пути воздействия на деятельность в нужных направлениях, компенсируя объективные недостатки некоторых элементов оборудования и характеристик окружающей среды.

В связи с развитием научных основ проектной эргономики особое значение приобретают такие задачи, как анализ факторов, влияющих на протекание различных видов деятельности; уточнение критериев эффективности и психофизиологического соответствия систем «человек—машина—среда», создание специализированных экспериментальных баз для исследования важнейших видов деятельности; разработка методов планирования и проведения многофакторных экспериментальных исследований, обобщение их результатов, разработка теории проектной эргономики; создание эргономических основ оптимального проектирования деятельности и теории оперативно-адаптивных систем.

3

Инженерная психология и художественное конструирование систем отображения информации в АСУ ТП

Одним из наиболее эффективных путей практического внедрения достижений инженерной психологии является их использование в процессе художественного конструирования комплексного оборудования пунктов управления. При этом особое значение имеет рациональная организация взаимодействия между специалистами в области инженерной психологии, эргономики, системотехники и технической эстетики. Наряду с инженерно-психологическими аспектами и практикой художественного конструирования пунктов управления подробно анализируются современные и перспективные типы средств отображения информации, дается их обстоятельная классификация по признакам, важным с точки зрения организации деятельности операторов АСУ. Обобщается опыт применения методов и результатов инженерно-психологических исследований в ходе проектирования систем отображения информации энергоблока, автоматизированного с применением управляющей вычислительной машины; аммиачного производства Щекинского химкомбината; автоматизированного слябинга 1150; объединенных энергосистем Урала и Закавказья; системы централизованного управления движением транспорта в г. Москве.

Глава

8

Типы систем и средств отображения информации, применяемых на операторских пунктах АСУ ТП

22

Современные и перспективные конструктивные типы СОИ

Успешное решение инженерно-психологических вопросов при синтезе многокомпонентных СОИ во многом зависит от наличия ассортимента необходимых информационных элементов, из которого могут быть выбраны оптимальные с точки зрения каждого конкретного случая. Для АСУ ТП такими элементами являются прежде всего цифровые, знаковые и графические индикаторы.

Ранее мы неоднократно подчеркивали, что мнемосхемы рассматриваются нами не только и не столько как конкретный тип СОИ, но как пример, в котором фокусируются многие психологические проблемы представления информации человеку-оператору. В то же время принципы построения мнемосхем могут в дальнейшем использоваться при составлении алгоритмов рационального представления по вызову человека специально подготовленных пакетов оперативной информации («файлов»). Мнемосхемы являются представителем, по-видимому, наиболее перспективных на ближайшие 20—30 лет графических типов СОИ, в том числе реализуемых с помощью ЭЛТ, плазменных и электролюминесцентных индикаторов, лазерных, голографических и других систем отображения.

Попытаемся рассмотреть тенденции развития информационных средств, предназначенных для применения по отдельности или в комплексе с другими типами СОИ, в том числе с многокомпонентными мнемосхемами, в АСУ ТП. Здесь мы приводим лишь общие сведения о характеристиках СОИ, важных с точки

 зрения психологических проблем организации деятельности

человека-оператора. Более подробное описание технических данных со ссылками на источники приведены в специальном обзоре.[1]

Знаковые индикаторы

Наряду с широко распространенными цифровыми индикаторами, в которых используются газоразрядные и электролюминесцентные устройства, при конструировании СОИ начали применять также индикаторы на светоизлучающих диодах и жидких кристаллах.

Когда впервые появились индикаторы на светоизлучающих диодах, отличавшиеся, как и почти все новинки, очень высокой стоимостью, казалось, что их стоимость будет неуклонно падать, и они быстро вытеснят газоразрядные и электролюминесцентные цифровые индикаторы. Однако два обстоятельства — появление индикаторов новых типов, в частности, на жидких кристаллах и чрезвычайно медленное снижение цен на светодиоды задержали их распространение, сделав его вообще весьма проблематичным.

Наиболее распространенным типом индикаторов на светоизлучающих диодах остается семисегментный индикатор. Это объясняется тем, что на изготовление монолитных блоков требуется больше материала, стоимость которого сравнительно высока; что же касается точечных (растровых) матриц, позволяющих отображать буквенно-цифровые символы, то слишком дорогими оказываются необходимые для них схемы управления. Лучше всего отработаны индикаторы на светоизлучающих диодах с красным свечением. Диоды с зеленым свечением, пригодные для цифровых индикаторов, пока имеются лишь в виде опытных образцов. Высота знаков в индикаторах на светоизлучающих диодах не превышает 15 мм. Нетрудно объяснить, почему индикаторы на светоизлучающих диодах часто называют логическими заменителями газоразрядных ламп. Полупроводниковые индикаторы компактны, имеют высокую механическую прочность и дают четкие, яркие знаки. Наряду с этим индикаторы на светоизлучающих диодах потребляют сравнительно малую мощность: семисегментный символ высотой 6,4 мм, как правило, потребляет около 100 мВт на сегмент при напряжении 5 В постоянного тока.

Несмотря на то, что стоимость индикаторов на светоизлучающих диодах, по-видимому, не может стать меньше стоимости газоразрядных и других ламповых индикаторов, индикаторы на светоизлучающих диодах тем не менее должны найти применение благодаря лучшим условиям восприятия информации и соответственно более высокой эффективности деятельности

---

[1] См. **Венда В. Ф.**, **Дризовский Л. М.** Современные средства отображения информации. М., изд. ЦНИИТЭИ Приборостроения, 1973, 63 с.

человека-оператора. Особенно хорошие условия зрительного различения знаков, составленных из светоизлучающих диодов, при экономии потребляемой мощности обеспечиваются в случае мультиплексного управления индикатором: при равном среднем токе более ярким кажется изображение на индикаторе из светоизлучающих диодов при импульсном возбуждении, чем при непрерывном. Такая закономерность квантовой эффективности индикатора является свойством материала — арсенид-фосфида галлия.

Светодиоды с зеленым свечением изготовляются из фосфида галлия. Однако у этого типа индикаторов очень мала квантовая эффективность: она составляет всего 0,2%, в то время как арсенид-фосфидгаллиевые диоды (с красным свечением) имеют квантовую эффективность — 7%, причем даже после повышения квантовой эффективности остается проблема, связанная с особенно жесткими требованиями к соблюдению технологического режима, поскольку зеленые индикаторы должны иметь намного бо́льшую стабильность цвета, чем красные. Как известно, глаз человека обладает сравнительно высоким дифференциальным порогом различения яркости и длин волн свечения в красном участке спектра. Зато в зеленом участке спектра цветовая чувствительность глаза максимальна. Сопоставляя время и усилия, затрачиваемые на совершенствование индикаторов на светоизлучающих диодах, с полученными и предполагаемыми в обозримые сроки успехами их применения в СОИ, не лишне вспомнить сходную великолепную идею туннельных диодов, которая так и не оправдала возлагавшихся на нее надежд. Впрочем, продолжающиеся во всем мире работы по совершенствованию светодиодов, возможно, развеют скептическое отношение к этому типу индикаторов.

Очень быстро развиваются индикаторы на жидких кристаллах, которые еще в 1968 г. были чрезвычайной лабораторной редкостью. Сейчас же индикаторы на жидких кристаллах представляются потенциально едва ли не наиболее важными из всех цифровых индикационных средств. Причина успеха приборов на жидких кристаллах объясняется главным образом тем, что они открывают возможности достигнуть четкой индикации при высоком уровне внешнего освещения, а также очень малого (порядка микроватт) рассеяния мощности и чрезвычайно низкой стоимости.

Химические соединения, применяемые для индикаторов—это прозрачные органические жидкости, становящиеся непрозрачными под воздействием электрического поля. Индикаторы изготовляют путем введения тонкого слоя жидкости между двумя стеклянными пластинами. Одна пластина покрывается проводящей пленкой целиком, а на другую наносится трафарет, например такой же, как в семисегментном индикаторе. При этом удается осуществить избирательное наложение электрических полей и получить требуемые знаки. Поскольку индикатор ра-

ботает по принципу отражения, а не излучения света, то чем ярче внешняя засветка, тем лучше видны отображаемые данные. Малое потребление мощности объясняется тем, что структура стекло — жидкий кристалл — стекло имеет очень высокое электрическое сопротивление.

Материал жидких кристаллов дешев, производство несложно, поскольку изменение коэффициента отражения происходит вследствие явлений в толще, а не на граничной поверхности.

Однако совершенствование индикаторов на жидких кристаллах связано с серьезными проблемами. Одна из них — влияние температуры: разработанные до настоящего времени материалы для жидких кристаллов могут эффективно использоваться при температуре в пределах 0—70° С. Другая — инерционность материала: для перехода от непрозрачного состояния к прозрачному требуется около 200 мс. Этот медленный переход виден невооруженным глазом.

Наиболее серьезный недостаток с точки зрения представления информации человеку — инерционность — может быть устранен, если пойти на примерно четырехкратное увеличение потребления мощности и накладывать мощное выключающее электрическое поле, под воздействием которого время восстановления прозрачности будет резко снижено, так что остаточные изображения зрительно восприниматься не будут.

В то время как индикаторы на жидких кристаллах и на светоизлучающих диодах еще находятся в стадии полупромышленных разработок, наибольшее распространение получили цифровые индикаторы типа «Никси» (советский аналог — ИН-1, ИН-2) и подобные им газоразрядные приборы, причем появляются новые модификации таких индикаторов.

Разработан индикатор «Селфскэн», представляющий собой точечную матрицу, изображение знаков на которой получается возбуждением тлеющего разряда в соответствующих точках. Этот так называемый плазменный индикатор предназначается в основном для крупных СОИ на операторских пунктах АСУ или в блоках вывода информации из ЭВМ.

Средними по свойствам между индикаторами типа «Никси» и «Селфскэн» являются индикаторы типа «Панаплекс». Такой индикатор представляет собой электровакуумный прибор, содержащий 8, 12 или 16 знаков с высотой 10 мм. Подобно «Никси», «Панаплекс» представляет собой газоразрядный прибор с холодным катодом, и, следовательно, относится к высоковольтным индикаторам. Однако в отличие от «Никси» в индикаторе «Панаплекс» формирование символов осуществляется в структуре из 9 сегментов, каждый из которых является катодом; анодом служит сетчатый электрод, расположенный перед знаками.

Необходимо отметить, что считавшиеся некогда многообещающими электролюминесцентные индикаторы так и не достигли совершенства. В 50-е годы многие крупные зарубежные фирмы пытались изготовлять их, но ни одна не сумела удовле-

творительно разрешить проблему, связанную с малым сроком службы люминофоров и нестабильностью их характеристик во времени.

Однако в последние годы разработан метод изготовления многоцветных буквенно-цифровых систем отображения на основе диодов из арсенида галлия с добавкой кремния. Для воспроизведения знаков служит люминофорное покрытие, преобразующее инфракрасное (ИК) излучение диодов в видимый свет различных цветов. Стоимость индикатора неуклонно снижается по мере совершенствования технологии обработки монолитного полупроводникового материала, являющегося основой индикатора. Таким образом, комбинированное применение светоизлучающих диодов и люминесцентных материалов открывает новые возможности в конструировании буквенно-цифровых индикаторов.

В качестве люминофора для воспроизведения знаков зеленого цвета иногда применяют трехфтористый лантан, стимулированное ИК-радиацией, видимое излучение от которого приходится в основном на волну 5400 Å; это близко к максимуму кривой чувствительности глаза, что существенно повышает эффективность восприятия сигналов.

При использовании некоторых люминофоров путем изменения ширины импульсов возбуждения можно регулировать относительное содержание красного и зеленого излучения, что позволяет получать выходной световой поток различного цвета: красный, желтый, вплоть до бледно-зеленого. Такая подстройка оказывается возможной благодаря тому, что скорости нарастания интенсивности разных составляющих излучения сильно отличаются друг от друга: интенсивность красного излучения нарастает медленнее, чем желтого; следовательно, излучение практически имеет красный цвет при непрерывном токе возбуждения, ярко-желтый цвет при возбуждении 2-микросекундными импульсами и бледно-зеленый — при возбуждении 100-микросекундными импульсами. Яркость излучения составляет 170 нит при среднем токе 50 мА. Амплитуда токового импульса для получения желтого излучения равна 625 мА при частоте следования импульсов 40 МГц.

Средства отображения информации, основанные на применении электроннолучевых трубок

До середины 60-х годов устройства отображения на ЭЛТ, несмотря на широкое применение в ряде областей, в первую очередь в радиолокации, редко использовались в качестве средств оперативного взаимодействия человека-оператора с ЭВМ. В основном для вывода информации применялись печатающие внешние устройства. Впоследствии был выявлен ряд

преимуществ устройств отображения на ЭЛТ, в том числе возможность ввода данных со скоростью 120—300 знаков в секунду по сравнению с 10—20 знаками в секунду у печатающих устройств, бесшумная работа, обеспечение выборочного стирания или изменения информации, возможность передачи полученной информации другим звеньям системы. Все этот привело к широкому применению средств отображения на ЭЛТ.

При использовании ЭЛТ для отображения сменных мнемосхем и другой оперативной графической информации устройство должно отвечать следующим требованиям.

1. Иметь значительную эффективную площадь экрана (не менее, чем 40×30, 50×40 см) при высокой разрешающей способности, количество адресов по вертикальной и горизонтальной координатам не менее 1024×1024 точек.

2. Позволять регулировать размер сфокусированной точки в зависимости от детальности информации и расстояния наблюдения от 0,2 до 0,5 мм в диаметре.

3. Минимальная нелинейность растра не должна превышать 0,5—1%.

4. Иметь высокую скорость перемещения луча в линейном режиме без зрительно воспринимаемого движения луча или мерцания при большой суммарной длине линий в кадре. Необходимы скорость перемещения луча порядка 0,5—1 см/мкс, частота смены кадров 40—50 Гц.

5. Располагать достаточным набором знаков для отображения параметров и существенных деталей объекта, высокой скоростью вычерчивания знаков.

6. Иметь высокую скорость обращения к буферному запоминающему устройству или памяти ЭВМ и передачи данных по каналу сопряжения, соответствующую реальному времени решения оперативных задач и частоте запросов человеком информации.

7. Позволять отображать одновременно на экране достаточное число символов для воспроизведения наиболее сложной реальной схемы (до 2000 символов).

8. Средства ввода графической информации — световое перо и функциональная клавиатура должны позволить вводить данные для обработки их вычислительной машиной, изменять или стирать отдельные части изображения, изменять масштаб всего отображения или его частей, изображать на экране отдельные знаки и линии, осуществлять поворот и сдвиг изображения, изменять положение начала координат и масштаб времени.

9. Конструкция алфавитно-цифровой клавиатуры должна соответствовать требованиям эргономики, предъявляемым к подобным устройствам.

10. В комплект СОИ должна входить аппаратура для снятия копий графической информации.

11. Необходимо предусматривать возможность визуально разделять технологические потоки и другие элементы информации цветом, толщиной и формой линий. Яркость линий не менее 100 нит.

12. Условия восприятия графической знаковой и буквенно-цифровой информации должны соответствовать требованиям психофизиологии зрения.

13. ЭВМ, с которой связана ЭЛТ, должна иметь достаточное математическое обеспечение.

14. Иметь высокую надежность.

Различные ЭЛТ в настоящее время отличаются размером экрана, видом отображаемой информации, методами и скоростью генерации знаков и т. д. В целом их можно разделить на две группы. К первой относятся устройства для отображения буквенно-цифровой информации от простейших, предназначенных только для вывода информации из памяти машины, до устройства с алфавитно-цифровой и функциональной клавиатурой или световым пером для ввода в ЭВМ информации оператором.

Кроме алфавитно-цифровых имеется большая группа более сложных ЭЛТ, предназначенных для вывода графической информации. Они применяются для отображения мнемосхем, символов, графиков и т. д. Отображающие устройства обеих групп работают совместно с ЭВМ, причем состав аппаратуры и математического обеспечения определяют задачи, которые может выполнять устройство отображения как средство связи между человеком и машиной.

При формировании знаков в ЭЛТ типа «Характрон» на экране отображаются буквы, цифры, математические символы и др. Выбор конфигурации знака производится с помощью матрицы, расположенной на пути луча к экрану. Матрица представляет собой металлическую пластинку, в которой прорезаны контуры отображаемых знаков. Вид знаков определяется назначением индикатора, а их максимальное количество ограничивается технологией изготовления самой матрицы и погрешностями формирования управляющих напряжений или токов. Набор символов весьма ограничен, и для изменения его обычно требуется новая ЭЛТ. Трудность динамической фокусировки луча и невозможность получения цветного изображения также относятся к недостаткам знаковых ЭЛТ.

Более совершенен функциональный метод знакогенерирования. Он весьма распространен и характеризуется большим разнообразием способов практической реализации: использование фигур Лиссажу, метод растра, формирование символов с помощью отрезков, штрихов и т. д.

При использовании фигур Лиссажу выбирается образующая, в контур которой целиком вписывается каждый отображаемый знак. При этом для воспроизведения знака при перемещении электронного луча по фигуре Лиссажу подсвечи-

ваются только те ее участки, которые совпадают с контуром данного знака. Недостатком этого метода является сложность наложения различных синусоидальных напряжений, имеющих различную амплитуду и фазу при одновременной модуляции электронного луча в определенные моменты времени. Для обеспечения высокой надежности зрительного различения отображаемых символов необходимо использовать целый ряд гармоник (до пятой включительно), что удорожает устройство и снижает скорость его работы.

При применении способа программируемых точек знак формируется с помощь матрицы магнитных ферритовых сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса. В простых наборах символов достаточно использовать матрицу из 5×7 сердечников. Однако воспроизведение наборов символов, достаточных для представления оператору состояния сложных управляемых технологических объектов, этим методом весьма затруднено.

Несколько более высокое качество отображаемых символов при меньшем количестве элементов дает метод формирования знаков из отрезков прямых линий. Хорошее качество знаков обеспечивается в случае, если знак составляется не менее чем из 10—15 отрезков. Используя линии различной длины и различного направления, можно получить значительный набор символов.

Современные ЭЛТ дают следующие основные виды изображений: таблицы, символы, элементы окружности, а также точки в любой комбинации, которая задается программой. Посредством соответствующих команд происходит выбор требуемого в определенный момент времени вида изображения и таких его характеристик, как число знаков в строке, начальное положение первого знака, начало новой строки; осуществляется группировка строк, пропуск в тексте, перемещение пятна на матрице, что позволяет выводить подписи и размещать группы буквенно-цифровых или других знаков на экране в нужном порядке. Определяется размер пропуска между символами, положение символа на матрице 256×256, размер символа, произвольное или последовательное размещение знаков или символов. При изображении окружностей могут выбираться положение центра окружности на матрице, способ записи окружности (сплошной или штриховой линией), диаметр окружности, требуемый квадрант окружности. Команда для записи знаков или символов, которые выводятся с помощью штрихов, устанавливает угол расположения (56 углов в пределах 360°) и длину штриха. Знаки и символы размещаются внутри площади квадранта, длина стороны которого равна 15 единицам длины штриха. Знаки или символы, которые должны быть отображены, предварительно организуются в наборы. Наборы знаков содержат в среднем 50 буквенно-цифровых знаков и 50 специальных символов. С помощью программы можно запоминать и извлекать для отображения до 4 различных наборов знаков.

Для организации двустороннего взаимодействия человека и ЭВМ применяется световое перо, причем логическая схема адресации и положения светового пера позволяет считывать текущий адрес памяти при наличии сигнала от светового пера. Возможности, которые представляют оператору сочетание ЭЛТ и светового пера при наличии специальных программ управления и слежения за положением светового пера, очень широки. Световое перо и аналогичные ему устройства ввода начинают сейчас использовать для формирования мнемосхем, анализа сетей связи, цифрового моделирования систем, изображения с помощью диаграмм хода выполнения программ ЭВМ и т. д.

Наряду с совершенствованием ЭЛТ ведутся активные разработки плоских экранов из дискретных индикаторов элементов. Индикаторные устройства на твердом теле являются весьма перспективными для отображения мнемосхем технологических объектов.

К таким СОИ относятся электролюминесцентные панели с матричной адресацией, обеспечивающей запоминание поданного комплексного сигнала всеми светящимися элементами. Применение матричной адресации не решает проблемы получения высокой яркости, так как не исключает необходимости периодического сканирования по всему экрану. Требуется применение метода, при котором использовались бы отдельные запоминающие элементы, непосредственно связанные с каждой высвечиваемой точкой. Это возможно при комбинировании электролюминесцентных и фотопроводниковых элементов. Этот способ сможет в дальнейшем обеспечить разрешающую способность индикатора до 8 линий/см.

Достоинством электролюминесцентных СОИ на твердотельных элементах являются высокие разрешающая способность и яркость, отсутствие подвижных частей и проекционной оптики, малое потребление энергии, малые габариты. Однако в настоящее время они еще имеют малый срок службы (1000—2000 ч) и требуют весьма сложных переключающих схем и источников питания.

К плоским твердотельным устройствам относятся также магнитооптические панели. Они могут применяться для вывода графической информации из ЭВМ. Конструкция устройства и способ подключения во многих отношениях аналогичны устройствам магнитной памяти ЭВМ. Изображение воспринимается в отраженном свете. Возможно выборочное стирание изображения. Время переключения элементов отображения составляет всего 10 мкс. Дальнейшие разработки в основном направлены на увеличение размеров панели.

Качество изображения символов на матричных СОИ, в том числе электролюминесцентных, магнитооптических и особенно плазменных, уступает знакам, генерируемым в ЭЛТ. Тем не менее уже известны матричные плазменные информационные панели, которые при размере 15×15 см и толщине 13 мм на-

считывают до 18 тыс. точечных светящихся элементов, что позволяет их использовать как основу плоского телевизионного экрана.

Тем не менее все эти индикационные устройства, так или иначе имитирующие свойства ЭЛТ, не способны пока серьезно конкурировать с самими ЭЛТ, которые также постоянно совершенствуются.

Широкое применение в устройствах отображения алфавитно-цифровой информации получили ЭЛТ с памятью. В обычных ЭЛТ в связи с уменьшением яркости изображения во избежание мерцания необходима его регенерация с частотой не менее 30 Гц. При этом используются память машины или буферные запоминающие устройства. Возможность запоминать информацию без возобновления упрощает электронную часть устройства отображения, исключает необходимость в буферной памяти, обеспечивает высокий уровень яркости. Обновление изображения может происходить достаточно редко с помощью оперативного запоминающего устройства вычислительной машины, кроме того, регенерацию можно производить и по телефонным линиям связи. Недостатком ЭЛТ с памятью является более высокий, чем в обычных, уровень помех, снижающий надежность восприятия информации. Другим недостатком запоминающих ЭЛТ является невозможность избирательного стирания информации, однако уже есть устройства, которые позволяют производить частичную корректировку изображения.

Особой модификацией ЭЛТ, принципиально отличающейся от других их типов, являются индикаторные устройства с цифровым отклонением луча. Метод цифрового отклонения исключает необходимость в дискретно-аналоговых преобразователях сигналов малого уровня и в их последующем усилении. Эти индикаторные устройства отличаются большой точностью и надежностью работы, так как не требуют высоких напряжений.

Бурное развитие АСУ потребовало создания СОИ с цветовым кодированием, пригодных для воспроизведения сложных технологических схем, графиков, диаграмм и т. п.

При использовании обычных способов разложения цвета на экране цветное изображение получается как комбинация трех исходных. Такая система даже при умеренном качестве изображения требует дорогой сложной оптики и еще более дорогой и сложной аппаратуры механической юстировки. Кроме того, трудно поддерживать совмещение этих изображений в течение длительного времени. Хотя среди цветных устройств отображения вариант с несколькими электронными пушками достаточно отработан для телевидения, разрешающая способность его еще недостаточна для использования при отображении оперативной графической и алфавитно-цифровой информации. Известен вариант цветной ЭЛТ с одной пушкой и вертикальными

цветными полосками красного, зеленого и синего люминофора. Однако это решение хотя и уменьшает стоимость цветных трубок, сложность схем управления лучом затрудняет его широкое использование. Для создания цветных устройств отображения изучаются возможности применения фотохромных процессов с использованием ЭЛТ с волоконной оптикой.

Один из методов получения цветного изображения связан с применением так называемой линзорастровой пленки. При этом оказывается возможным записать отдельные цветные изображения на одном чернобелом кадре пленки и после обработки проецировать изображение в цвете на обычный экран.

При необходимости может быть применена и цветная пленка. К достоинствам устройства относится возможность использования простой оптики, состоящей из одной линзы, взамен системы трех согласованных линз.

В одной из конструкций для подкраски (вирирования) изображений на экранах ЭЛТ с высокой разрешающей способностью, используемых в качестве индикаторов на операторских пунктах, применена дополнительная подсветка внутренней поверхности экрана ЭЛТ монохроматическим светом через окно на боковой поверхности конусной части баллона. Если электронный пучок возбуждает на экране зеленое свечение, а подсветка производится красным светом, то изменением соотношения яркостей этих двух источников можно получить различные оттенки желто-зеленого цвета за счет некоторого рассеяния света на внутренней поверхности экрана. Например, при яркости красного цвета порядка 17 нит и яркости зеленого порядка 10 нит можно получить 27 нит желтого цвета. Возможность воспроизведения двух цветов на экране обычных ЭЛТ расширяет информационную емкость СОИ. Если же экран ЭЛТ имеет 2 цвета (например, красный и синий), то подсветка зеленым светом позволит воспроизводить 7 цветовых оттенков, включая белый. Широкому распространению цветного отображения оперативной информации на ЭЛТ пока еще препятствует недостаточная точность воспроизведения цвета на экране.

Важной задачей является создание аппаратуры для вывода информации с ЭЛТ на различные носители и большой экран. Эта аппаратура дает возможность сохранять, размножать и контролировать отображаемую информацию. Вывод информации на различные носители может осуществляться с помощью фотосъемки, киносъемки, термопластического, электропластического, электрографического и других видов копирования.

Отображение информации на большой экран с использованием фотографии заключается в том, что изображение, высвечиваемое на экране ЭЛТ, снимается на фотопленку, которая затем обрабатывается, и полученное изображение проецируется на большой экран. Неизбежная при этом временная задержка между вводом информации и ее отображением сокращена до нескольких секунд. Проектор с промежуточным фильмом по-

зволяет получать изображение на большом экране с высокой четкостью и яркостью. Предложенный нами способ применения такого устройства для отображения сменных мнемосхем описан в работе [21]. Однако устройство в целом получается довольно громоздким и сложным в эксплуатации.

Устройства, выполненные на принципе поверхностной деформации среды — масляной или термопластической пленки, составили особую ветвь проекционных устройств отображения. При этом в систему проецирования изображения на большой экран входит светомодулирующее устройство с масляной пленкой, толщина которой изменяется в соответствии с электрическими сигналами. При использовании термопластического метода на поверхность легкоплавкого термопластика с помощью электронного луча наносится рельеф.

В процессе дальнейшей тепловой обработки термопластика возникают механические деформации его поверхности, величина которых пропорциональна записываемому сигналу. Эти деформации нарушают оптическую однородность пленки для проходящих через нее лучей света, что позволяет получить проекцию изображения на большом экране. Время воспроизведения изображения, содержащего миллион элементов, составляет около 5 с. Время хранения информации варьируется от долей секунды до весьма больших величин за счет регулирования температуры термопластика. Известно устройство подобного типа, но с применением ЭЛТ, позволяющее получать изображение в течение миллисекунд. В устройство входит барабан из материала с высокой температурой плавления, на поверхность которого наносится электропроводный слой, а затем слой термопластического материала с низкой температурой плавления. Луч падает на поверхность барабана, изображение траектории луча проявляется при нагреве и фиксируется охлаждением. Имеются системы для записи информации на термопластическом материале с помощью луча лазера.

Метод электрографии, как известно, основан на фиксации изображений на промежуточном носителе. При этом выводимая информация первоначально отображается на ЭЛТ, с экрана которой изображение проецируется на электрографическую пластинку с селеновым слоем. Световой поток зеркально отражается от участков селенового слоя, не покрытых проявляющим порошком, и с помощью оптической системы фокусируется на матовом экране, на котором отображается информация в виде светлых знаков на темном фоне.

В целом использование устройства с промежуточной записью информации может дать в будущем высококачественный универсальный проектор для больших экранов, обеспечивающий динамическое и статическое представление информации.

Для повышения эффективности использования устройства отображения человеком-оператором большое значение имеют

разработки средств ввода информации в ЭВМ с помощью ЭЛТ. К таким сердствам относится, в частности, так называемое «световое перо». Световое перо можно направлять на любой участок изображения, прикладывая его к поверхности экрана. Применяемый в схеме устройства фотоэлемент реагирует на изменение интенсивности свечения экрана ЭЛТ. Поскольку луч «пера» хорошо сфокусирован (он имеет в диаметре несколько миллиметров), полученный сигнал дает возможность зафиксировать координаты положения выбранного участка с высокой точностью и скоростью. Пользуясь пером, оператор может «отмечать» любые точки или их совокупности на поверхности экрана ЭЛТ и обмениваться с ЭВМ любой относящейся к ним информацией (координаты, код знака, инструкции, запросы и т. п.). Это позволяет ему не только вносить изменения в отображаемую информацию (выделение, замена, перемещения, дополнительные сведения и т. д.), но и выполнять на экране устройства всевозможные построения, непосредственно связываясь при этом с ЭВМ.

Применяются также схемы управления, в которые входят металлический стержень («карандаш») и доска, представляющая собой медную сетку, с рабочей поверхностью примерно 25×25 см. Когда кончик «карандаша» перемещается по сетке, эти сигналы благодаря наличию емкостной (электростатической) связи считываются для передачи с ЭВМ и отображаются на экране ЭЛТ. Высокая разрешающая способность устройства (около 4 линий на 1 мм) позволяет отмечать около миллиона отдельных участков поверхности. Таким образом, оператор может «писать» или «рисовать» на ней, как обычно, наблюдая полученное изображение на экране, и передавать информацию непосредственно в машину. На наш взгляд, подобные устройства могут в дальнейшем играть очень существенную роль в деятельности оператора, позволяя привлекать ЭВМ к оценке степени адекватности концептуальной модели, сформированной оператором, действительному состоянию объекта. Человек, восприняв информацию, вычерчивает функциональную схему объекта, как он ее представляет по неполной информационной модели. Если решить возникшую задачу машина не может, то ее можно использовать для проверки правильности информационной базы принятия решения человеком и сравнительной оценки вариантов конечных состояний управляемой системы, к которым могут привести разные варианты обсуждаемых человеком решений.

Трудная совместимость всех видов аппаратуры управления и отображения, высокие сложность и стоимость, недостаточная надежность ограничивают пока возможности широкого применения этих устройств, однако их создание расценивается как наиболее важное из последних достижений в области ЭВМ, направленных на решение проблемы эффективной связи между человеком и машиной.

В ближайшее время должны быть развернуты обширные психологические исследования методов рациональной организации такой связи. Многие специалисты предполагают, что средствами связи с ЭВМ человек будет пользоваться так же легко, как сейчас карандашом и бумагой. Такая аналогия представляется даже недостаточно смелой. Вместо бумаги оператор будет иметь очень эрудированного, скрупулезного и быстрого подсказчика и помощника. Мы имеем дело с совершенно новым видом взаимодействия человека с техникой, при этом обеспечение высокой эффективности и благоприятного для человека-оператора психологического климата связано с решением комплекса технических и психологических проблем, связанных с созданием общей теории индивидуально адаптивных систем взаимодействия оператора с партнерами и с ЭВМ по принципу «гибридного интеллекта».

Некоторые перспективные конструкции средств отображения информации (по зарубежным данным)

СОИ с большим экраном на световых клапанах. В 1970 г. в США был создан и испытан прибор, получивший название светового клапана со световым возбуждением. Изображение размером 6,5×6,5 мм поступает на вход прибора, многократно усиливается при помощи простой оптической системы и проецируется на настенный экран.

В настоящее время в качестве фотопроводника используется селен. В дальнейшем предполагается перейти на сульфид кадмия и тем самым повысить яркость в 100 раз.

Основным узлом прибора является пара фотопроводник — жидкий кристалл, помещаемая между двумя прозрачными электродами. Между фотопроводником и жидким кристаллом помещен непрозрачный отражающий слой, который оптически разделяет эти элементы пары. Эта слоистая структура образует плоскость изображения системы проекции, состоящей из объектива, источника света, отражающего затвора и проекционного экрана. Разрешающая способность прибора составляет около 10—20 линий на 1 мм. Главное преимущество конструкции заключается в неограниченном размере экрана.

Прибор работает следующим образом. Свет изображения попадает на ячейку, состоящую из фотопроводника и жидкого кристалла. На ячейку подается постоянное напряжение смещения таким образом, что при отсутствии изображения большая часть напряжения падает на фотопроводнике, а напряжение на жидком кристалле остается ниже его порогового напряжения включения. При появлении изображения от фотопроводника к жидкому кристаллу идет ток, который в точках проводимости создает динамическое рассеяние света. На жидкий кристалл проецируется свет от источника. Если изображение отсутствует, свет отражается от поверхности жидкого кристалла и на экран не попадает. При появлении изображения в жидком кристалле возникает динамическое рассеяние, проецирующий свет также рассеивается и, минуя затвор, попадает на экран, где и воспроизводится изображение. Поскольку проецирующий свет во много раз ярче изображения, усиление может быть огромным — в тысячи раз.

Лазеры в системах отображения информации. Одним из многообещающих направлений в развитии устройства отображения является применение лазеров. Теоретические возможности их использования находятся далеко за пределами возможностей многих других типов устройств отображения.

Разработки методов вывода информации на большие экраны с помощью лазера были начаты задолго до создания промышленных лазерных генераторов и получения лазерной энергии в виде непрерывного излучения. Инте-

рес исследователей и специалистов по отображению вызвали такие характеристики лазера, как высокая когерентность и монохроматичность излучения, которые позволяют получать изображение с разрешающей способностью в несколько миллионов элементов, отображать в реальном масштабе времени процессы, протекающие со скоростями, превышающими скорости, возможные при использовании электроннолучевых трубок.

Последние исследования в области лазеров с излучением в видимой части спектра указывают на возможность построения разнообразных цветных лазерных систем отображения. Вообще лазерное отображение осуществляется путем записи изображения лучом лазера на пассивном или активном экране, пленке, пластинке и т. п. для последующей его проекции.

Разновидности этих методов могут обеспечивать цветные и чернобелые изображения при использовании полной растровой развертки, скачкообразной растровой развертки или записи произвольного позиционного типа. Такие системы отображения выполняются с отклонением светового луча и без отклонений. На практике отклонение световых лучей посредством электронно-оптических материалов пока не реализовано.

Имеются цветные лазерные отображающие устройства с механическим сканированием. В одной из конструкций аргон-неоновый лазер дает синий и зеленый свет, гелий-неоновый — красный свет; излучения модулируются, комбинируются и затем отражаются с помощью 32-гранного зеркала. Каждая грань скошена так, что осуществляется горизонтальное и вертикальное сканирование. Результирующее изображение в семи цветах, выводимое со скоростью 60 кадров/с, состоит из 512×512 точечных элементов, дискретно отображаемых на экране. Размер экрана достигает $1,5\times1,5$ м. На экране можно изображать буквенно-цифровые и специальные символы, мнемосхемы, гистограммы и т. п. Следует отметить, что отсутствие памяти на экранах приводит к очень низкой видимой яркости и увеличивает мерцание.

В устройствах без отклонения луча зеркало заменено электрооптическим кристаллом, с помощью которого при сканировании модулированным электронным лучом осуществляется двойное лучепреломление. Здесь реализуются преимущества электронного сканирования и возможность хранения изображения, определяемая свойствами кристалла.

Плазменные индикаторные панели, воспроизводящие цветные и полутоновые изображения. Наряду с созданием цветных плазменных индикаторных панелей ведутся разработки плазменных индикаторов, которые смогут воспроизводить шкалу тонов или полутоновые изображения. В существующих панелях каждая точка находится лишь в одном из двух состояний: либо светится, либо не светится. Это ограничивает область применения плазменных панелей в основном индикаторами буквенно-цифровой и графической (штриховой) информации. На универсальных СОИ на операторских пунктах желательно иметь и полутоновые изображения.

В частности, спроектирована панель, состоящая из трех независимо управляемых слоев и двух расположенных между ними пленок, которые обеспечивают ослабление световых сигналов. Ячейки во всех трех слоях генерируют свет одной и той же интенсивности. Однако свет от нижнего излучающего слоя проходит через оба ослабляющих слоя, свет от среднего излучающего слоя — через один ослабляющий слой, в то время как свет от верхнего излучающего слоя приходит к наблюдателю без ослабления. Такая конструкция позволяет, комбинируя по-разному излучение всех трех слоев, получать восемь различных полутонов, или тонов «серой шкалы»: от полного отсутствия свечения (все три слоя выключены) до максимальной яркости (все три слоя включены).

Известен и другой принцип воспроизведения полутоновых изображений: различные уровни интенсивности света получают путем изменения числа световых импульсов, генерируемых в единицу времени. Этот метод основан на использовании дискретного конденсатора или собственной емкости панели. В плазменной индикаторной панели емкостями и одновременно ключами служат отдельные светоизлучающие ячейки. Для управления величиной предварительного заряда емкости изменяют длительность или амплитуду импульса. За этим импульсом следует импульс поддерживающего напряжения специ-

альной формы, который применяется вместо обычного используемого поддерживающего напряжения в виде синусоиды. Последний импульс вызывает два, четыре или шесть дополнительных разрядов в течение одного цикла в зависимости от уровня предварительного заряда емкости. Если же предварительный заряд отсутствовал, то эти разряды вообще не возникают. Это позволяет воспроизвести на панели в общей сложности четыре градации полутонов, соответствующие нулю, двум, четырем или шести разрядам в течение цикла. Типичная длительность цикла равна 60 мкс.

В третьем методе воспроизведения полутоновых изображений развертка запускается не как обычно генератором тактовых импульсов, а начальным сигналом независимо управляемого растра, с помощью которого разлагается отображаемая информация. Этот растр, кроме того, дает управляющую информацию, посредством которой осуществляется фазовая модуляция тока, поступающего на индикатор. Этой модуляцией определяются моменты вторичного разряда во фронтальной части каждой ячейки. Благодаря относительному сдвигу между моментами возбуждения разряда во фронтальной и задней частях ячейки достигается эффект воспроизведения полутонов.

Изменение цвета воспроизводимых знаков в многоцветных индикаторных плазменных панелях обеспечивается путем регулирования тока в газоразрядных ячейках. Цвет изменяется дискретно или плавно в зависимости от применяемых управляющих схем. Использованием принципа саморазвертки для управления индикаторной панелью минимизируется число адресных и формирующих схем. Такая индикаторная панель воспроизводит знаки любого цвета — от красного до зеленого.

Подобно монохроматическим плазменным индикаторам многоцветная панель состоит из шести основных частей: заднего стекла, системы горизонтальных развертывающих анодов, системы вертикальных катодов, непрозрачной центральной пластины из изоляционного материала, содержащей ряды отверстий, которые образуют газонаполненные ячейки, системы горизонтальных индикаторных анодов и переднего стекла.

Газовый разряд возникает в каждом пересечении катодов и развертывающих анодов последовательно — столбец за столбцом. Столбец пересечений с возникшим в них разрядом подготавливает к последующему разряду соответствующий столбец ячеек центральной пластины. В свою очередь, возникновение разряда в этих ячейках зависит от состояний индикаторных анодов. Последние расположены под прямым углом к подготовленному столбцу ячеек, и на эти аноды подаются управляющие сигналы, синхронизированные с разверткой разряда в задней части панели. Таким образом, светящиеся знаки, которые видны через переднее стекло панели, формируются газонаполненными ячейками, в которых возникает разряд. Сопровождающее разряд излучение содержит ультрафиолетовую компоненту, а люминофор излучает видимый свет соответствующего цвета. Наличие регулируемого источника тока позволяет осуществлять непрерывное изменение цвета от зеленого до красного. Применение полупрозрачного переднего стекла устраняет колебания в цвете, которые иначе бы наблюдались при считывании данных с панели под разными углами зрения.

Другое конструктивное решение основано на использовании того, что излучение неонового разряда имеет составляющие и в видимой, и в ультрафиолетовой частях спектра. В многоцветной панели «Селфскэн» стенки ячеек покрыты люминофором, который при возбуждении ультрафиолетовыми лучами излучает зеленый свет. При слабых токах излучается достаточно ультрафиолетовых лучей для насыщения люминофора, в результате чего получается зеленый цвет. По мере того как ток возрастает, интенсивность видимого излучения неона также возрастает. Сначала в ходе этого процесса сильная желтая линия (585 Å) становится достаточно яркой, чтобы перекрыть зеленый свет от люминофора. Затем при еще более сильных токах становится заметным свечение красной части спектра. Между тем вследствие насыщения излучение люминофора практически не возрастает, хотя интенсивность ультрафиолетового излучения увеличивается в такой же степени, как интенсивность желтого и красного цветов. Интенсивность света, излучаемого неоном, является практически линейной функцией анодного тока, и при малых токах

она ниже интенсивности излучения люминофора. Насыщение люминофора происходит уже при токе в ячейке, равном 0,1 мА, в то время как видимое излучение неона продолжает возрастать и при увеличении тока сверх 1 мА. При таких токах интенсивность излучения неона оказывается значительно выше интенсивности излучения люминофора. Но поскольку глаз человека не обладает острой чувствительностью к изменению интенсивности световой энергии и притом в меньшей степени чувствителен к красному свету, чем к зеленому, интенсивности обоих этих цветов представляются сбалансированными.

Путем выбора подходящего люминофора вместо красно-зеленого цветового диапазона получают другие. Необходимо отметить, что появление новых типов люминофоров, в частности на основе сульфида цинка, эрбия, таллия, и более совершенных способов их нанесения на панель открыло определенные перспективы дальнейшего совершенствования и электролюминесцентных многоцветных СОИ.

Например, с использованием новых высоконадежных и долговечных электролюминесцентных элементов в ФРГ создано устройство отображения, у которого, как ожидают, начальная яркость будет уменьшаться наполовину лишь после 10 тыс. часов работы. Применение модульной конструкции позволяет изготовлять экраны разных размеров. Стандартная площадь экрана 1,4—2,5 м². Панель состоит из 14-сегментных индикаторов, каждый из которых при возбуждении переменным током формирует 63 различных знака, светящихся зеленым светом. В состав этих символов входят 36 буквенно-цифровых знаков и 27 специальных знаков, таких, как «плюс», «минус», скобки, маркеры, указательные стрелки и т. п. Формирование знака занимает 20—50 мкс.

Голография в отображении графической информации. Идея применения принципа голографии в создании СОИ тривиальна, однако реализация ее весьма сложна. Первым было разработано голографическое устройство ввода информации в ЭВМ, основанное на преобразовании графической информации с помощью луча лазера в форму двоичного кода.

Применение голографии позволило разработчикам устранить сложный аналого-цифровой преобразователь и средства для измерения расстояний по осям координат, обычно входящие в состав приборов для ввода графической информации.

При использовании нового устройства оператор чертит свою схему на бумаге обычной шариковой ручкой, а соединенный с ней лазерный пантограф обеспечивает идентичное передвижение луча по голограммной пластине. Подача лазерного излучения в «лазерную ручку» осуществляется через волоконный световод. Голограммная пластинка разделена на квадраты со стороной 0,25 мм, при этом получается матрица с числом элементов 128×128.

Когда луч лазера сканирует матрицу, голограмма преобразует его в систему дифракционных пучков, причем их распределение для каждого квадрата в горизонтальной плоскости определяется структурой связанной с ним голограммы. Эти пучки (они соответствуют дифракционным максимумам первого порядка) попадают на фотодетекторы (на каждую из координат X и Y приходится по семь детекторов), обусловливая срабатывание определенной комбинации фотоэлементов и формирование на цифровом выходе детекторного устройства двоичного сигнала, который подается на усилитель. В экспериментальном макете была достигнута скорость сканирования голограммы 10^4 позиций в секунду при разрешающей способности 2 линии на 1 мм.

Подводя итог приведенному краткому обзору основных современных и перспективных конструктивных типов СОИ, необходимо отметить, что совершенствование конструкций СОИ происходит в направлении повышения их быстродействия и разрешающей способности при воспроизведении знаковой, графической информации и цветовых кодов. С учетом этих перспектив большое значение имеют психологические исследования процессов принятия решения с применением моделей будущих

СОИ, например, реализуемых с помощью мнемосхем, характеризующихся максимальной разрешающей способностью, дополненных телевизионными, ЭЛТ и другими индикаторами. Уточнение рекомендаций, вырабатываемых в таких модельных экспериментах, для конкретных появляющихся новых типов СОИ, особенно в части психофизиологических условий их восприятия, должно проводиться в опытах с визуально идентичными образцами таких СОИ. При этом должны использоваться те оперативные задачи, процессы и факторы сложности решения которых по СОИ данной конструкции могут существенно отличаться от процессов и факторов сложности решения по моделям СОИ, реализованным в предыдущих психологических экспериментах, конечно, с учетом относительной важности отдельных типов задач и факторов их сложности.

Такое параллельно-последовательное ведение инженерно-психологических исследований вместе с техническими разработками новых систем и средств отображения информации является необходимым условием ускорения внедрения новой техники оперативного управления в АСУ.

23 Классификация СОИ по инженерно-психологическим признакам

В зависимости от того, является ли содержательная интерпретация информации, представляемой на СОИ, необходимым условием эффективной деятельности оператора, ассоциируются ли данные, получаемые оператором от СОИ, с реальным управляемым объектом или они условно являются абстрактными, СОИ можно разделять на ассоциативные и абстрактные.

По способу воспроизведения информации ассоциативные СОИ делятся на изобразительные (пиктографические), текстовые (фонографические) и индикационные; абстрактные СОИ по этому признаку делятся на аналитические, матричные, алгоритмические и структурные.

Изобразительные СОИ обеспечивают установление наиболее непосредственных ассоциаций между отображаемыми данными и состоянием управляемого объекта, поскольку они включают в себя элементы, обладающие внешним сходством с объектом (например, указатель в виде самолета на авиационном приборе) или условно изображающие технологическую схему, структуру управления объектом и т. п. Применение изобразительных СОИ часто позволяет повышать скорость действий оператора по сравнению, например, с индикационными СОИ, на которых информация предъявляется в виде аналоговых или цифровых показаний приборов, вспышек сигнальных ламп и т. п., что

требует обычно от оператора более сложного перекодирования, чем в случае изобразительных СОИ.

Аналитических СОИ, отображающих процесс оперативного управления технологическим объектом в виде математических формул, в настоящее время реально не существует. Впрочем это относится почти ко всем условно-абстрактным СОИ, кроме командно-информационных [21, 31] и матричных [30, 114]. Тем не менее мы уверены в их перспективности, поэтому решаемся включить их в классификацию. Алгоритмические СОИ отображают в наглядной форме, например, посредством древовидного графа [39] алгоритмы операций контроля, диагностирования ситуаций и управления. Структурные СОИ основаны на воспроизведении математической модели объекта в виде структурной схемы набора на соответствующем вычислительном устройстве.

СОИ могут быть разделены по способам их реализации.

Изобразительные СОИ реализуются в виде мнемонических схем, технологических схем и чертежей, объемных моделей и макетов, географических карт, панорамных локаторов и других символических средств. Особую группу составляют изобразительные СОИ, дающие наглядное представление об обстановке («эффект присутствия»), получившие условное название «контактных аналогов» [37, 59].

Текстовые СОИ выполняются обычно в виде световых сигнальных табло, постоянных инструкций, формуляров и т. п.

Индикационные СОИ или индикаторы делятся по форме отображения информации на аналоговые и дискретные. Аналитические (формульные) и матричные условно-абстрактные СОИ могут быть объединены в группу знаковых СОИ. Пример матричного «Компас-табло» подробно рассмотрен нами в гл. 4.

Алгоритмические СОИ в настоящее время могут быть реально представлены двумя типами: информационно-логическими СОИ и командно-информационными.

Структурные СОИ могут быть реализованы в виде структурно-динамических и наборно-модельных СОИ. Первые представляют собой изображение структурной схемы математической модели динамической управляемой системы. Дальнейшая детализация математической модели объекта, представление ее в виде схемы набора приводит к другой модификации структурных СОИ — наборно-модельному СОИ.

Следует заметить, что в зависимости от содержательной интерпретации оператором информации, поступающей от СОИ, возможна квалификация одного и того же СОИ как ассоциативного или абстрактного. Однако это не значит, что выбранный классификационный признак носит поверхностный, субъективный характер. На самом деле такая интерпретация определяется организацией оперативного управления, методами подготовки оперативного персонала.

Одним из возможных методов постепенного освоения сложнейших абстрактных СОИ может быть применение промежуточных между ассоциативными и абстрактными инвариантных СОИ. В наших опытах (см. гл. 1) это были СОИ, представляющие собой упрощенные информационно-оперативные модели сложных управляемых объектов, которым условно дается иная, более удобная (в смысле простоты понимания или уменьшения нервно-психической напряженности работы оператора) физическая интерпретация.

В табл. 29 указан ряд дополнительных классификационных признаков, по которым можно разделить все перечисленные типы СОИ. Следует иметь в виду, что под определенным углом зрения любой их них может рассматриваться как главный классификационный признак.

Учитывая широкое распространение на операторских пунктах АСУ технологических процессов мнемосхем в качестве структурной основы многокомпонентных СОИ, отдельно рассмотрим классификацию типов мнемосхемы.

Несмотря на то, что работы по созданию теории построения мнемосхем как графических информационных моделей АСУ ТП еще далеки до завершения, в практике их конструирования накоплен большой опыт. Обобщение этого опыта невозможно без классификации неизвестных, а также некоторых возможных типов мнемосхем. Вариант классификации мы приводим ниже. Главная цель — помочь инженерам и художникам-конструкторам разобраться в имеющихся типах мнемосхем, с тем чтобы в каждом случае при проектировании использовались те из них, которые наиболее соответствуют конкретным условиям труда операторов.

По функциям операторов, работающих с мнемосхемами, последние могут быть разделены на операторские и диспетчерские. Различие между этими типами состоит прежде всего в масштабе и сложности отображаемых управляемых объектов. В первом случае это, как правило, единый пространственно сосредоточенный технологический комплекс, во втором — рассредоточенная система, включающая разнообразные технологические агрегаты, объекты, комплексы.

Операторские и диспетчерские мнемосхемы резко различаются также степенью подробности отображения отдельных управляемых объектов, что непосредственно вытекает из различия функций операторов и диспетчеров и характера оперативных единиц управления, с которыми они имеют дело (этот вопрос подробно рассмотрен нами в [21]).

По тому, выполняет ли оператор какие-либо переключения непосредственно на мнемосхеме или она является чисто осведомительным информационным элементом, операторские мнемосхемы делятся на оперативные и неоперативные.

Вся мнемосхема или ее участки могут быть подключены к одним и тем же управляемым объектам или поочередно подключаться к нескольким объектам, имеющим одинаковую структуру. Иначе говоря, каждый информационный элемент мнемосхемы может быть связан с датчиками, установленными на одном или нескольких сходных объектах. В соответствии с этим мнемосхемы делятся на индивидуальные (однообъектные) и вызывные (многообъектные избирательные).

Таблица 29

Классификация типов СОИ

Основание классификации	Тип СОИ
Назначение информации	Для управления Для контроля Для статистического анализа
Важность информации	Аварийные Предупредительные Технологические Технико-экономические Прогностические
Отображение динамики	Статические Динамические
Совмещение с органами управления	Оперативные Неоперативные
Стабильность структуры	Постоянные Сменные
Способ разделения детальной и интегральной информации	С разделением во времени С разделением в пространстве
Число подключенных объектов	Индивидуальные Групповые (вызывные)
Число операторов, пользующихся данным СОИ	Персональные Коллективные
Подробность информации	Детальные Интегральные
Вид реакции операторов	Для немедленного обслуживания Для отсроченного обслуживания
Сохранение информации	Регистрирующие (запоминающие) Показывающие
Необходимость конкретной физической интерпретации	Ассоциативные Условно-абстрактные
Способ воспроизведения информации	Изобразительные Текстовые Индикационные Алгоритмические Структурные Аналитические Матричные
Форма представления информации	Аналоговые Дискретные
Виды изобразительных СОИ	Мнемосхемы Схемы и чертежи Объемные макеты Карты и панорамы Картинно-символические
Отображение объекта или средств управления и автоматизации	Первого порядка Второго порядка
Связь с объектом или моделью	Основные Вспомогательные
Конструктивные типы и принцип действия	На лампах накаливания Электромеханические На многокатодных газоразрядных лампах Люминесцентные Электрохимические и светоклапанные Проекционные Электрографические Плазменные На ЭЛТ На световодах, в том числе с волоконной оптикой Магнитооптические Лазерные Голографические

Необходимо различать вызывные мнемосхемы, целиком подключаемые то к одному, то к другому управляемому объекту, и вызывные (избирательные) системы контроля, позволяющие контролировать параметры одного и того же объекта, обозначенные на мнемосхеме, с помощью небольшого числа приборов, к которым поочередно подсоединяются однотипные датчики, установленные на одном и том же объекте. Таким образом, вместе с индивидуальной мнемосхемой, равно как и с вызывной, могут применяться и индивидуальная, и избирательная системы контроля.

Вызывные многообъектные мнемосхемы позволяют сократить размеры панели, наиболее рационально использовать центральную, оптимальную зону поля зрения оператора. Однако, как показали исследования, применение вызывных мнемосхем практически ограничено лишь наиболее простыми по своей функционально-технологической схеме (разумеется, в точности идентичными) объектами. Дело в том, что оператор с трудом улавливает различия в наборе сложных технологических схем, особенно если эти различия незначительны, а частота смены объектов, подключаемых к мнемосхеме, высока. Все это приводит к явлению интерференции решений и в результате — к грубым ошибкам. В этом случае кроме сигнализации нарушения в работе объектов должно особо сигнализироваться рассогласование между подключенной и предшествующей схемами. Квитирование этих видов сигнализации должно быть раздельным.

На мнемосхеме может быть постоянно отображена вся схема объекта или же изображение может существенно изменяться в зависимости от конкретных режимов работы объекта; например, сначала изображается пусковая схема, затем она сменяется схемой стабилизации нормального технологического режима, аварийной схемой и т. д. По этому признаку мнемосхемы могут быть разделены на постоянные и сменные. Необходимо отличать другую сменность мнемосхем: по мере обучения оперативного персонала с мнемосхем могут убираться становящиеся ненужными пояснительные надписи, подробности схемы и т. п.

По способу кодирования информации мнемосхемы делятся на условные и символические. Условные знаки отличаются от символов отсутствием внешнего сходства вообще зрительных ассоциаций с отображаемыми предметами или явлениями. Чисто условными мнемосхемы бывают очень редко; общий их рисунок разрабатывается на основе технологических или принципиальных схем, топографических карт и т. д.

Как показали экспериментальные исследования, отсутствие ассоциаций между знаками и отображаемыми параметрами или явлениями значительно затрудняет опознание знаков.

По принципу действия и технологии изготовления мнемосхемы делятся на рисованые (чаще всего нанесенные фотоспособом, поскольку попытки рисовать мнемосхемы, даже с помощью трафаретов, успеха не приносят), накладные (линии и знаки штампуются или выпиливаются и наклеиваются на гладкий фон), электролюминесцентные, проекционные, в том числе кинопроекционные, телевизионные, электрохимические, плазменные и на электроннолучевых трубках.

Выбор типа СОИ из существующих промышленно освоенных конструктивных вариантов должен основываться на анализе системы оперативного контроля и управления, функций и условий деятельности операторов, характеристик управляемого объекта (правил технической эксплуатации, технологической схемы, скорости протекания технологических процессов и т. д.). На основе такого анализа составляются требования к СОИ, в соответствии с которыми из приведенной классификации выбирается наиболее подходящий тип, точнее типы, поскольку в практике проектирования СОИ чаще всего приходится их комбинировать. В качестве примеров приведем некоторые рекомендации по выбору типа СОИ.

Как было показано ранее, для снижения реальной сложности оперативных задач борьба со всякого рода помехами и снижение доли иррелевантной информации на СОИ имеют первостепенное значение.

На СОИ должна воспроизводиться информация, наиболее представительная с точки зрения отражения состояния объекта и действительно необходимая оператору в соответствующих случаях. В этом смысле известные преимущества обеспечивает применение сменных СОИ. Избыточность информации допустима, когда она позволяет оператору ориентироваться в непредвиденных ситуациях, не снижая существенно надежность его работы при решении стандартных, наиболее часто встречающихся задач.

СОИ следует рассчитывать на одного оператора или группу операторов, выполняющих совместно одни и те же функции. Это условие позволяет не загружать СОИ разноплановой информацией, необходимой для выполнения различных функций и почти всегда превышающей по объему информацию, необходимую для одного оператора (или группы).

Информация должна быть соответствующим образом предварительно подготовлена в ЭВМ и представляться на СОИ в том виде, который наиболее подходит к ее использованию в дальнейшей работе оператора. Необходимость в перекодировании, пересчете и интерполяции данных, в также в переводе их из одной системы в другую должна быть по возможности исключена.

Там, где это возможно, на СОИ должны воспроизводиться не только сигналы об аварийных нарушениях режима, но и возможные пути их устранения. В определенных случаях с этой целью следует применять средства отображения командно-информационного типа.

Точность опознания отдельных элементов СОИ может быть существенно повышена использованием при их разработке некоторых устойчивых ассоциаций, отбором и комбинированием наиболее эффективных различительных признаков. Определенные преимущества в этом смысле имеют различные изобразительные СОИ, в частности мнемосхемы.

Повышение скорости восприятия сложной информации оператором может быть достигнуто с помощью применения комбинированных и интегральных СОИ. При этом, как правило, должна предусматриваться возможность избирательного контроля и анализа оператором отдельных параметров.

В целом выбор типа СОИ, равно как и решение последующих задач (выбор состава и структуры этого СОИ), должен быть направлен на уменьшение реальных значений рассмотренных выше основных факторов сложности решения оперативных задач с последующей экспериментальной оценкой спроектированного СОИ по показателям эффективности и напряженности деятельности человека-оператора.

Глава

9

Инженерно-психологические вопросы художественного конструирования систем отображения информации

24

Взаимодействие инженерной психологии, эргономики, системотехники и художественного конструирования при создании СОИ

Проблему наиболее рационального практического применения результатов инженерно-психологических и эргономических исследований при проектировании информационных систем и средств для АСУ ТП следует рассматривать в двух аспектах: в плане сотрудничества инженерной психологии и системотехники при решении вопросов, касающихся проектирования или анализа функционирования АСУ в целом, и в плане сотрудничества инженерной психологии, эргономики и художественного конструирования при проектировании СОИ и комплексного оборудования операторских пунктов.

Художественное конструирование, как и системотехника, тесно сотрудничает с инженерной психологией и эргономикой, поставляя им социальные заказы и одновременно обогащая их проблематику и методическую базу.

Как нельзя строго определить границы научных и практических проблем художественного конструирования — они непрерывно развиваются вместе с развитием общества, так нельзя строго определить и границы эргономики, ибо ее предмет — человеческая деятельность — также находится в непрестанном развитии. Таким образом, трудности строгого научного определения и художественного конструирования и эргономики про-

истекают от их близости к многообразию человеческой деятельности, от их практической направленности.

Развитию деятельности операторов, появлению принципиально новых ее видов в последние десятилетия существенно способствуют успехи системотехники, развитие автоматизированных систем управления. Вопросы взаимоотношения инженерной психологии, эргономики и системотехники подробно рассматривались в докладе, подготовленном совместно с Г. Л. Смоляном и прочитанном автором на Первой международной конференции ученых и специалистов по эргономике стран—членов СЭВ и СФРЮ, состоявшейся в Москве в 1972 г. [34].

Участвуя в решении системотехнических проблем, в проектировании и совершенствовании человеко-машинных систем, инженерная психология и эргономика занимаются комплексной оптимизацией деятельности людей в этих системах, решают задачи повышения эффективности систем путем повышения точности, скорости и надежности работы оперативного и обслуживающего персонала, добиваются гуманизации условий труда человека.

Одно из несомненных практических достижений инженерной психологии — то, что важность проблемы учета психологических факторов в проектировании систем признана почти всеми инженерами. Этот учет направлен на выработку наиболее рациональной структуры операторской деятельности, наилучших, комфортных ее условий. Трудно организовать всесторонний, грамотный и глубокий учет психологических факторов, требований и рекомендаций в условиях массового производства средств автоматизации, тем не менее проблему учета данных инженерной психологии надо решать при создании любых систем, в которых работает человек. Последовательный, разумно соотнесенный с временными и организационными этапами проектирования учет психологических требований — это стержень современного проектирования систем, главное звено функционально и экономически обоснованного проектирования, основа взаимоотношений и взаимовлияния психологии и системотехники.

Задачи инженерно-психологических исследований на различных стадиях и фазах проектирования систем определяются методологией и технологией проектирования. Проектирование — циклический процесс, при переходе от этапа к этапу психологические требования детализируются, корректируются и охватывают все более конкретные и частные технические решения. Так, на начальном этапе проектирования при анализе вариантов, выборе и обосновании общей структуры человеко-машинной системы вряд ли можно разумно поставить какие-либо вопросы, кроме главного — определения целесообразной степени автоматизации. Здесь на основе учета наиболее общих психологических и технико-экономических ограничений ре-

шается центральная задача автоматизации — распределение функций между персоналом и средствами автоматизации. Этот этап соответствует фазе разработки структурной схемы системы и ее отдельных звеньев и комплексов. Конкретный психологический анализ структуры решения задач операторами, учет инженерно-психологических рекомендаций и требований осуществляются на следующей, второй фазе проектирования — фазе разработки функциональных схем аппаратуры и алгоритмов деятельности операторов. Здесь разрабатываются логика, методы, аппаратура взаимодействия и согласования человека с техническими устройствами. Здесь — главное поле деятельности инженеров-психологов и эргономистов.

Что же находится в центре внимания проектировщиков аппаратуры взаимодействия с точки зрения инженерной психологии и эргономики? Не перечисляя все множество возникающих здесь вопросов, выделим главные. Это, во-первых, определение состава, характеристик и требований к внешним средствам деятельности операторов — к информационным моделям, рабочим местам и пультам управления. Во-вторых, это учет факторов внешней среды и разработка мероприятий, минимизирующих напряженность и утомление операторов, а также их потенциальные ошибки, в особенности в сложных и непредвиденных условиях. Наконец, в-третьих, это полное функциональное обеспечение деятельности операторов по решению возложенных на них задач, в том числе выбор рациональной степени их подготовки.

Дальше на пути конкретизации этих вопросов формулируются требования к средствам отображения информации, органам управления, размещению рабочих мест и в целом к интерьеру и оборудованию операторских пунктов.

На последующих этапах проектирования систем, в том числе на этапах их испытания и внедрения, по результатам инженерно-психологических разработок могут осуществляться коррекции принципиальных решений по распределению функций, составу и способам отображения информации и квалификации операторов.

Таким образом, инженерная психология, эргономика и системотехника составляют монолитную основу методологии проектирования человеко-машинных систем. Однако известны и отступления от такой концепции тесного взаимодействия. Все еще бытует чисто технический подход, когда проектируется возможный максимум функций автоматов, а остальное возлагается на человека без учета того, складываются ли эти остатки функций в психологически цельную структуру деятельности или нет. Эта крайность представляет собой «ископаемый доэргономический анахронизм» и встречается все реже.

Известны также попытки некоторых инженеров-психологов самостоятельно, в отрыве от системотехников, решать весь комплекс вопросов при проектировании человеко-машинных

систем. Практика проектирования АСУ выявила ограниченность и ошибочность обеих этих крайних точек зрения.

Инженерная психология не только способствует решению многих проблем системотехники, но и заимствует у последней многие методические приемы, в первую очередь математический аппарат и методы моделирования с применением современной вычислительной техники. Как было показано ранее, в инженерно-психологическом анализе деятельности операторов могут в определенных случаях сыграть положительную роль модели, использующие аппарат теории массового обслуживания. С помощью этих моделей нами выявлены некоторые информационные предпосылки «гиперстабильности» деятельности при изменении многих параметров внешних условий (см. гл. 7).

Методы теоретико-вероятностного анализа состояния системы позволяют определять оптимальное количество источников информации для СОИ, отображающих функционирование системы в аварийных режимах. Такой расчет выполнен для крупного энергообъединения.

Применение математического моделирования управляемых технологических систем при лабораторных психологических исследованиях деятельности операторов с информационными средствами различных типов позволяет оперировать активными критериями при сравнении художественно-конструкторских вариантов средств отображения информации.

Как известно, в некоторых психологических исследованиях, проводимых в основном инженерами, делаются нередко попытки моделировать не только динамику технических объектов, но и поведение операторов. Для простейших функций, таких как слежение, это часто удается. Более важные для АСУ функции человека-оператора такие, как диагностирование состояния и принятие решения, подобному моделированию пока не поддаются, что накладывает определенные ограничения на применение моделей поведения человека-оператора при проектировании сложных систем. Причем главные трудности состоят не в подборе языка для таких моделей, а в познании содержательно-психологической стороны сложного процесса, каким является принятие оперативных решений. Представляется полезным продолжение психологического анализа факторов, обусловливающих сложность решения оперативных задач, в частности факторов, зависящих от структуры информационных моделей АСУ.

Опыт работы в области проектирования операторских пунктов АСУ показывает, что практический союз инженерной психологии и системотехники дает существенный народнохозяйственный эффект. Приведем лишь некоторые примеры, которые далее в этом разделе будут рассмотрены более подробно. Комплекс инженерно-психологических исследований, проведенный в ходе проектирования системы управления тепловой электростанцией, автоматизированной с применением

управляющих вычислительных машин, позволил сосредоточить в руках одного оператора и тем самым оптимизировать управление рекордным объемом оборудования — двойным теплофикационным энергоблоком. При этом обеспечена, даже при отключении управляющей машины, высокая надежность оперативного управления без увеличения напряженности деятельности человека по сравнению с менее мощными объектами.

На основе инженерно-психологического и эргономического анализа труда операторов разработаны рекомендации и создан проект реконструкции пункта управления одним из крупнейших цехов Щекинского химкомбината. После внедрения проекта время устранения серьезных нарушений технологических режимов уменьшилось в среднем на 15%, численность оперативного и вспомогательного персонала сократилась на 40%, повысилась культура производства, точность введения технологических процессов и качество выпускаемых продуктов. Затраты на эргономические исследования, создание проекта и его реализацию окупились за один год.

Существенный вклад психологи и эргономисты ВНИИТЭ внесли в совершенствование управления рядом крупных энергообъединений, в разработку пункта централизованного телеавтоматического управления движением транспорта в г. Москве. Средний эффект от внедрения результатов психологических исследований составляет 150—300 тыс. руб. на одну такую систему.

Таким образом, дальнейшее расширение тесного сотрудничества инженерной психологии, эргономики и системотехники имеет большое научное и народнохозяйственное значение.

Одним из наиболее эффективных практических средств реализации достижений психологии в практике проектирования человеко-машинных систем, комплексного оборудования и интерьеров операторских пунктов является применение методов художественного конструирования. Об этом свидетельствует более чем десятилетний опыт работы лаборатории, руководимой автором в этой области [32].

Упоминавшиеся выше специфические трудности явились причиной того, что до сих пор нет еще общепринятого однозначного определения художественного конструирования. Однако для каждой конкретной узкой области такое определение может быть дано. В области проектирования оборудования операторских пунктов, в том числе СОИ, мы пользуемся следующим определением: «Художественное конструирование есть многообразная коллективная деятельность — исследовательская, проектно-конструкторская, технологическая, связанная с применением методов формообразования в процессе оптимального синтеза систем «человек—машина—среда» с использованием критериев, учитывающих психологические, эргономические, технические, социологические, эстетические и экономические

факторы. Определение степени оптимальности конечного результата должно основываться на системе количественных оценок по отдельным факторам и сведении их в обобщенный критерий.

Если рассмотреть весь процесс художественного конструирования СОИ [21], то нетрудно заметить, что он может быть разделен как бы на два уровня в соответствии с масштабом вопросов, решаемых на этом или ином этапе. Верхний уровень включает более крупные, общие вопросы, такие как определение требований к системе «человек—машина», разделение функций между оператором и техническими устройствами, согласование потока сигналов с реальной производительностью оператора, поиск возможных вариантов СОИ, удовлетворяющих требованиям системы, выбор экспериментальных методик и аналитического аппарата. На нижнем уровне решаются более частные вопросы, связанные с конкретизацией выбранных ранее принципиальных положений, осуществляется разработка конструкции СОИ, макетирование, изготовление образцов. Учитывая масштаб задач, эти уровни, точнее стадии, могут быть названы соответственно макроконструированием и микроконструированием [21].

25 Применение принципа структурности при проектировании СОИ

Как показали исследования психологических факторов, обусловливающих сложность решения оперативных задач, эффективность деятельности оператора с оперативно-информационной моделью может быть существенно превышена при условии уменьшения реального числа оперативных единиц восприятия, обозначенного ранее как фактор сложности решения задач K_{10p}. При постоянном общем числе информационных элементов, размещенных на СОИ, снижения K_{10p} можно добиться укрупнением оперативных единиц восприятия — обеспечением наглядной структурно-композиционной связи между функционально (семантически) связанными элементами объекта, которые должны восприниматься целостно при общей, интегральной оценке состояния объекта (системы).

Придание обособленным участкам СОИ или группам информационных элементов, отображающих относительно автономные явления или детали объекта, для облегчения их восприятия как целостных оперативных единиц особой формы (структуры), легко запоминающейся и дифференцирующейся от других, названо нами принципом структурности.

Из многочисленных проведенных опытов следует, что соблюдение этого принципа имеет существенное значение в про-

ектировании СОИ, обеспечивая повышение эффективности деятельности операторов. Учет принципа структурности важен также и потому, что СОИ должно разрабатываться не только как важнейший информационный элемент, орудие труда человека-оператора, но и как объект эстетического восприятия. Художественные достоинства СОИ в значительной степени определяют психологическое состояние, эмоциональный тонус оператора. Нет сомнения в том, что глубокая всесторонняя функциональная, в том числе инженерно-психологическая обоснованность конструкции и компоновки СОИ играет первостепенную роль, но сама по себе она не всегда обеспечивает свойство структурности СОИ и его высокие эстетические качества. В то же время необходимо отметить, что в настоящее время нет строгих, формальных методов построения структуры сложных, многокомпонентных СОИ. Для реализации принципа структурности необходимо в ходе проектирования СОИ применять специальные художественно-композиционные средства и приемы.

Набор средств, которые могут применяться при построении структуры СОИ, чрезвычайно обширен. Многие из них могут быть заимствованы почти в неизменном виде из разных областей изобразительного искусства. Так, например, по специфике решаемых на плоскости художественно-композиционных задач создание графических СОИ типа мнемосхем близко к станковой и фундаментальной живописи и книжной графике. С другой стороны, функциональная направленность и утилитарность сближают их с архитектурой.

Опыт показывает, что создание сложных многокомпонентных графических СОИ должно основываться на синтетическом использовании теории архитектурной композиции [41] и изобразительного искусства, развитой в работах Фаворского, Маца, Гильдебрандта, Мондриана, Эшфорда, Ван Дорена и др. Разработанные в этих областях композиционные средства, такие как симметрия и асимметрия, метрическая повторность и ритм, контраст и нюанс, пропорции, масштаб, цвет, фактура, а кроме того, специфические для информационной техники средства — изменение цвета и яркости (светящиеся, мерцающие сигналы), движение, смена изображений и др. открывают перед художником-конструктором поистине колоссальные возможности для создания СОИ как особой разновидности произведений перспективного промышленного искусства.

Впервые на целесообразность применения средств художественной композиции для повышения эффективности операций приема информации человеком указали Б. Ф. Ломов и П. А. Кудин [71].

Поиск художественно-композиционного решения СОИ должен быть направлен на снижение реальных значений факторов сложности восприятия информации и решения оперативных задач с учетом имеющихся технических средств.

Б. Ф. Ломов указывает, что средства художественного конструирования в конечном счете направлены на то, чтобы вызвать тот или иной психологический эффект у работающего человека. Применяя средства художественного конструирования, мы создаем положительные эмоции, облегчаем операцию приема информации человеком, улучшаем концентрацию и переключение внимания, повышаем скорость и точность действия. Короче говоря, мы пользуемся этими средствами для управления поведением человека в широком смысле этого слова, для управления его психическим состоянием [76].

Необходимо отметить, что художественная композиция является, как правило, завершающим этапом проектирования СОИ. Это означает, что в результате работ на этом этапе получается окончательное решение, которое должно соответствовать всем требованиям, предъявляемым к устройствам данного класса: техническим, эргономическим, эстетическим. Этот довод уже сам по себе отвергает всякую возможность отрыва данного этапа от предыдущих. Нельзя представить себе, что инженеры и психологи к этому времени уже заканчивают свою работу над проектом и передают эстафету художникам, призванным «эстетизировать» конструкцию. Продолжается все та же совместная работа, но центр тяжести всей совокупности многочисленных и разнообразных вопросов перемещается в сторону художественно-композиционных проблем. Решение их никак не должно осуществляться за счет ухудшения технических и инженерно-психологических показателей. Напротив, совместными усилиями последние могут (и, как правило, должны) быть повышены на завершающем этапе.

Результирующая конструкция должна быть технически и функционально совершенной, способной правильно организовать деятельность оператора, быть художественно выразительной.

В каждом конкретном случае в зависимости от специфики функций оператора, уровня инженерно-технических достижений, социально-исторических факторов и т. п. художественная выразительность может трактоваться и оцениваться по-разному.

Тем не менее можно указать ряд композиционных закономерностей и приемов, которые в целом остаются незыблемыми, составляют постоянную методическую основу создания и совершенствования структуры СОИ. Прежде всего это универсальное для всех видов художественно-конструкторской деятельности требование (точнее закон) строгого соответствия композиционного решения, формы, структуры функциональному назначению, содержанию изделия, в данном случае — СОИ. При этом само композиционное решение должно быть цельным, гармоничным.

Композиционная завязка состоит в определении целого и его основных частей, составлении «иерархии» частей и деталей по их важности для организации восприятия оператора, выборе главного и вспомогательных компози-

ционных центров. Важным условием завершенности композиции является уравновешенность ее частей относительно главного центра. Заметим, что во всех случаях, кроме специально оговоренных, мы будем иметь в виду композицию СОИ в нормальном, т. е. наиболее вероятном режиме. Возникновение различных сигналов и решение оператором особых задач должны рассматриваться отдельно при решении композиционных задач. Причем иногда временная незавершенность композиции может допускаться преднамеренно и играть роль усилителя сигналов о нарушении нормальных режимов. На этом основан, например, предложенный нами способ облегчения зрительного обнаружения неполадок в сигнальных элементах СОИ, — в том числе поиск перегоревших ламп [91]. Световые элементы располагаются на СОИ по принципу структурности — они образуют легко прослеживаемые четкие композиционно уравновешенные фигуры. При перегорании одной или нескольких ламп равновесие нарушается. Целесообразно проводить контроль ламп при отключенном внешнем освещении: тогда линии мнемосхем не просматриваются, внимание контролера сосредоточивается на фигурах, образуемых лампами, и он быстро обнаруживает искажения этих фигур. Наоборот, при нормальном освещении оператор не воспринимает этих фигур из-за наличия в поле зрения множества других деталей СОИ. На этом частном вопросе мы остановились, чтобы отметить возможную неоднозначность самой структуры СОИ: она может изменяться в зависимости от задач, решаемых оператором с опорой на данное СОИ.

Поиск равновесия осуществляется по-разному в симметричных и асимметричных композициях. При наличии симметрии задача, как правило, весьма упрощается. Если взятая за основу структуры СОИ функциональная или топологическая схема объекта сама по себе симметрична, то и равновесие пусть даже большого числа разнообразных информационных элементов и символов достигается легко, почти автоматически. С другой стороны, при большом числе элементов, приблизительно одинаковых по форме и размерам, поиск равновесия на первый взгляд должен быть тривиальным — расположить слева и справа от оси одинаковое число элементов. Однако на практике равновесия обычно достигнуть не удается, поскольку в этом случае обычно бывает трудно обозначить ось симметрии. А отсутствие зрительной оси придает всему построению аморфность. Попутно заметим, что ось (или средний элемент) горизонтального ряда одинаковых предметов, расположенных на равных расстояниях, перестает фиксироваться наблюдателем, если число предметов превышает 7, т. е. человек уже не может, взглянув на предметы, сразу пересчитать их. В этом случае необходимо разбивать предметы на группы, вводя определенную ритмическую последовательность.

Задача поиска равновесия существенно сложнее в случае асимметрии. Гармоничность асимметричной композиции СОИ может быть достигнута за счет зрительного уравновешивания неодинаковых по структуре, форме и размерам частей по отношению к четко выраженной оси или композиционному центру.

Равновесие асимметричных графических композиций мнемосхем иногда достигается концентрическим расположением элементов вокруг единого центра. При этом диаметры окружностей могут находиться в ритмическом соотношении, например соответствовать членам геометрической прогрессии. Этим обеспечивается не только равновесие асимметричной композиции, но и ее

динамичность — движение к центру, где в этом случае располагаются основные информационные элементы и, следовательно, должно концентрироваться внимание оператора.

Чаще всего основу композиции мнемосхемы составляют горизонтали и вертикали. Например, это могут быть линии — контуры оборудования или технологические потоки. Но нередко горизонтали и вертикали могут состоять из точек или компактных изображений. Расположение треугольников и квадратов, скажем, обозначающих на схеме энергетической системы электростанции и подстанции, в виде горизонтальных и вертикальных рядов позволяет создать достаточно стройную общую структуру мнемосхемы. При этом важно то, что глаз наблюдателя (оператора или диспетчера) в процессе поиска сигнала или условного обозначения объекта или при прослеживании технологического процесса совершает не хаотические движения, а упорядоченные, состоящие из наиболее простых и привычных элементов — горизонтальных и вертикальных смещений, количество которых должно быть по возможности минимальным.

Компонуя мнемосхему, следует учитывать особенности биомеханики глаза, в частности то, что горизонтальные движения глаз совершаются наиболее легко и быстро. Менее быстры вертикальные движения. Скорость движения глаз по кривой зависит от формы и может варьироваться в широких пределах.

В нашей лаборатории была предпринята экспериментальная проверка соотношения между скоростью движения глаз при прослеживании линий мнемосхемы, имеющих различную конфигурацию, и надежностью обнаружения деталей и сигналов, расположенных на этих линиях.

Выявлено, что эти показатели могут иногда находиться в обратном соотношении, поэтому в местах расположения наиболее важных информационных элементов на мнемосхеме следует помещать структурные элементы, при прослеживании которых снижается скорость движения глаз, например узлы линий, их большая кривизна или резкое изменение направления.

Порядок обзора оператором элементов СОИ, имеющих одинаковую априорную информативность (важность), определяется в большинстве случаев силой каждого визуального раздражителя, например при прочих равных условиях, — площадью отдельных композиционных элементов. Однако применение специальных приемов, например придание композиции динамизма, помогает в случае надобности изменять порядок обзора элементов.

В процессе художественного конструирования СОИ нередко возникает задача размещения большого числа сходных по форме элементов — сигнальных ламп, табло или приборов.

В теории композиции известно два вида закономерностей повторности элементов — метрическая и ритмическая. Метрическая повторность основана на равномерном чередовании одного или нескольких элементов. Примером могут служить приборные щиты. При большом числе приборов метр приводит к монотонности, затрудняет обнаружение одного или нескольких приборов, информация от которых необходима оператору. Более интересные композиционные возможности дает

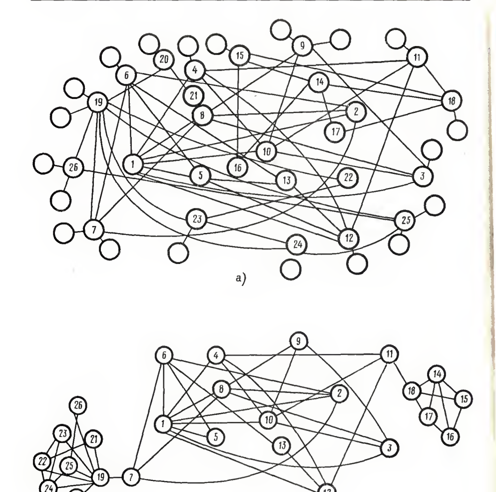
другой вид повторности — ритм. В дополнение к простому метру, который обычно сопровождает ритмическое чередование, ритм предполагает также закономерное изменение некоторых характеристик: расстояний между элементами, их числа в группах, формы или размеров элементов и т. д.

Завершенность ритмического строя элементов зависит от того, как «остановлен ритм», т. е. как выполнены концы ряда. Ритмический ряд элементов СОИ должен быть завершен и слева, и справа. Для этого могут использоваться следующие приемы: 1) увеличение интервалов перед крайними группами элементов (крайними «тактами»); 2) усиление акцентов на центральных группах с применением вспомогательных средств (размеров шильд, цвета и т. д.); 3) включение в крайние группы инородных элементов (например, крупных приборов-регистраторов, наборов сигнальных табло, шильд с инструкциями и т. д.); 4) объединение крайних элементов в группы неразвитого нового ритмического ряда, гармонически согласующегося с основным, и т. п.

Обрамление изобразительной поверхности СОИ и характер изображения у его краев существенно влияют на то, воспринимается ли данное СОИ как самостоятельный замкнутый зрительный объект или как один из элементов какого-то более обширного информационного комплекса. В случае, если СОИ отображает полную информацию, необходимую для управления автономным технологическим агрегатом или замкнутой системой, четкая зрительная ограниченность вполне оправдана, поскольку это позволяет сосредоточить внимание наблюдателя-оператора. Напротив, если СОИ является лишь одним из нескольких информационных элементов, данные от которых должны суммироваться и использоваться оператором поочередно, или если отображаемый объект связан с другими, состояние которых должно учитываться оператором (по сути это один из вариантов предыдущего более общего условия), то композиция СОИ, в особенности его периферия и обрамление, должна позволять наблюдателю легко зрительно переходить от него к другим информационным элементам и вновь возвращаться к нему, постоянно ощущать связь данного СОИ и отображаемого на нем объекта с другими информационными элементами и соответствующими им объектами. С другой стороны, границы и обрамление всех СОИ, прежде всего их конфигурация, влияют и на процесс восприятия элементов внутри данного устройства.

Одна из структурно-композиционных оценок характеризуется как масштабность СОИ; она определяется соотношением размеров элементов и всего СОИ, отдельных деталей и элементов между собой и т. д.

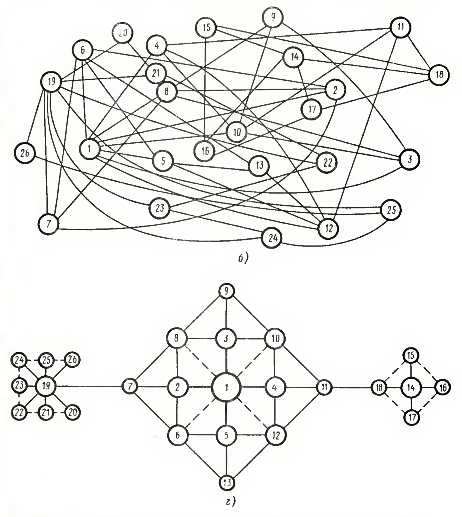
При проектировании мнемосхем основная трудность выбора масштаба заключается в том, что, с одной стороны, мнемосхема является самостоятельным изделием относительно небольших габаритов и в этом плане «малой формой». С другой стороны, самостоятельность мнемосхемы весьма относительна, поскольку она является моделью управляемого объекта или системы. Если рассматривать мнемосхему во втором плане, то она должна строиться как уменьшенная модель «большой формы» с сохранением членений и изображением деталей исходной формы отображаемого агрегата. Известно немало случаев, когда мнемосхемы выполнялись именно так: условные обозначения



42 *Применение принципов структурности, лаконичности и автономности отображающего связи между 26 основными блоками, элементами и параме-*

а — связи между блоками, конструктивными элементами и параметрами объекта, матического регулирования объекта на СОИ; б — исходная схема, сокращенная по ственные для выбранной ступени иерархической АСУ ТП; *в* — схема системы, разнения принципа структурности и композиционных приемов

агрегатов, например турбин, ректификационных колонн или реакторов делались выпуклыми, рельефными и снабжались многочисленными деталями, характерными для внешней формы агрегатов. Такое выполнение мнемосхемы не оправдано как с эстетической точки зрения, поскольку придание малой форме черт большой всегда нарушает масштабность, так и с функ-



совместно с композиционными приемами при построении графического СОИ,
трами объекта:

если их непосредственно перенести с технологических схем и схем контроля и авто-
принципу лаконичности — изъяты элементы с одинарными связями как несуще-
бита на три подсистемы по принципу автономности; *г* — та же схема после приме-

циональной, поскольку это приводит к перегрузке мнемосхем излишними деталями (а следовательно, и избыточной информацией), усложняет ее конструкцию. Лаконизм в изображении мнемосхемы, обобщение и унификация условных обозначений агрегатов, использование единого обоснованного модуля, стилевое единство, преимущественное выделение (акцент) наиболее

существенных с точки зрения деятельности оператора элементов контроля и управления — эти требования направлены одновременно и на рационализацию способов подачи информации, и на повышение эстетических качеств СОИ, в частности, на правильный выбор его масштабности.

Иллюстрация применения принципов структурности, лаконичности и автономности совместно с композиционными приемами при построении графического СОИ, отображающего связи между 25 основными блоками, элементами и параметрами объекта приведена на рис. 42.

Важной композиционной задачей при создании СОИ иногда является передача направления движения технологических потоков в условиях нормального протекания режимов и, следовательно, общей статичности СОИ.

Композиционными факторами являются также контраст и нюанс. В теории композиции под контрастом или контрастным отношением принято понимать резко выраженные различия между однородными свойствами элементов, такими как размеры, цвет, освещенность, характер расположения, фактура материала и т. п. Соответственно под нюансом, или нюансным отношением, понимаются незначительные различия между однородными свойствами.

Художественный смысл использования нюанса и контраста при проектировании СОИ может быть резюмирован в нескольких положениях. Нюанс и контраст только тогда усиливают эстетические качества изображения, его выразительность, когда они не противоречат другим композиционным приемам, примененным при создании СОИ, а усиливают и дополняют их. Например, цветовой контраст между фоном мнемосхемы и обозначениями основных технологических агрегатов помогает подчеркнуть роль последних как композиционных центров. Нюанс и контраст могут служить самостоятельными средствами функциональной характеристики элементов СОИ. В предыдущем примере различные степени цветового контраста или замена его нюансом могут использоваться для обозначения степени важности агрегатов. Нюанс и контраст могут переходить друг в друга, придавая динамичность изображению. Цветовой нюанс между отключенным аварийно-предупредительным сигнальным табло и фоном панели переходит в резкий контраст, когда табло подсвечивается ярким мигающим светом. Нюанс и контраст, как правило, одновременно оба присутствуют в композиционном решении, поскольку один из этих приемов подчеркивается и усиливается вторым, придавая особую выразительность композиции в целом. Воздействие контраста между сигналом о нарушении режима и фоном усиливается нюансным отношением между фоном СОИ и его элементами, соответствующими нормальной работе агрегатов. В определенных случаях контраст между двумя элементами или их состояниями может быть заменен цепью элементов или их состояний, в которой каждая пара соседних элементов или последовательных состояний находится в нюансном отношении, а крайние элементы или состояния — в исходном констрастном. Примером может служить распространенный способ уменьшения цветового контраста между двумя пятнами путем размещения между ними одного или нескольких других пятен, окрашенных в промежуточные цвета.

Вообще, обсуждая вопросы применения художественно-композиционных приемов для реализации принципа структурности при проектировании СОИ, нельзя не коснуться вопросов

их цветового решения. Оптимальные цветовые характеристики СОИ могут способствовать повышению эффективности восприятия информации и снижению зрительного утомления оператора. Выбор цветового решения СОИ должен основываться на учете законов цветоведения и данных об особенностях психофизиологического влияния цвета на человека.

Известно, что разные цвета оказывают различное влияние на организм человека в зависимости от цветового тона, насыщенности, яркости, длительности воздействия данного цвета, места, занимаемого им в поле зрения. Весьма существенно сочетание цветов, которые воздействуют одновременно на зрительный анализатор. Так, например, белый цвет, сам по себе относящийся к оптимальным, в соседстве с черным образует резко контрастное по яркости сочетание, которое при необходимости поочередно переводить глаза с белого поля на черное и обратно, что связано с перестройкой мышечного аппарата глаза, вызывает быстрое зрительное утомление.

Цветовая композиция длительно воспринимаемого СОИ в значительной степени обусловливает эмоциональное состояние оператора. Определяющую роль при этом может играть один преобладающий цвет, скажем, цвет фона или цветочное сочетание, которое определяет характер данной композиции.

Светлые цвета улучшают эмоциональное состояние, вызывают ощущение бодрости. Последнее особенно важно, когда на операторском пункте работа идет круглосуточно. В этом случае цветовое решение должно быть ориентировано прежде всего на наиболее трудные ночные условия. Примером может служить цветовое решение мнемосхемы ТЭЦ-21 Мосэнерго, которое описывается ниже.

Однако эмоциональное воздействие цветов определяется не только характером их физиологического влияния. Явление в целом весьма сложно и связано, в частности, с символикой цвета, в том числе национальной, индивидуальным опытом человека и т. п.

Восприятие цветовых сочетаний и их эмоциональное воздействие зависят не только от собственных характеристик цветов, но и от соотношения площадей, занимаемых каждым цветом. При изменении этого соотношения изменяется субъективно воспринимаемый цвет, изменяются и ассоциации, порождаемые цветовым сочетанием. На эти процессы существенно влияют также длительность восприятия, психологическая установка и специфика функций человека.

Важным фактором восприятия многоцветных СОИ является соотношение яркостей. Яркостный контраст между знаками и фоном СОИ может быть прямым — темные знаки на светлом фоне и обратным — светлые знаки на темном фоне. Тип контраста самым существенным образом сказывается на характере зависимости остроты зрения от уровня освещенности СОИ. В случае прямого контраста увеличение общей освещенности приводит к возрастанию остроты зрения (причем при освещенности выше 50 лк этот эффект проявляется слабо).

При обратном контрасте также наблюдается возрастание остроты зрения с увеличением освещенности, но только до 5—8 лк; при дальнейшем повышении освещенности острота зрения резко падает, что объясняется явлением иррадиации.

Условия восприятия знаков на СОИ с прямым контрастом при нормальном освещении лучше, чем при обратном. Надо сказать, что этот факт долгое время дебатировался в инженерно-психологической литературе. В 1961 г. нам не удалось на основе литературных данных решить однозначно вопрос о выборе прямого или обратного контраста для элементов избирательной системы мнемосхемы тепловой электростанции. По нашей просьбе Д. Н. Завалишина провела экспериментальные иссле-

дования с целью сравнения элементов мнемосхемы с прямым и обратным констрастом по скорости и точности считывания номеров элементов. В случае применения мнемосимволов с прямым контрастом скорость и точность опознания оказались несколько выше, чем мнемосимволов с обратным контрастом, особенно при отсутствии внутренней подсветки.

При низкой освещенности значения порогового контраста превосходят в десятки раз аналогичные величины для высокой освещенности. Величина контраста для мнемосхем, обеспечивающая достаточно надежную различимость деталей, выбирается равной 15—25-кратной пороговой (для избранного уровня освещенности).

Увеличение контраста между деталями мнемосхемы и фоном улучшает условия зрительного восприятия мнемосхемы эффективнее, чем увеличение освещенности. Например, увеличение надежности зрительного восприятия с 55 до 90% достигается увеличением освещенности в 20 раз (от 10 до 200 лк) или увеличением контраста в 2,5 раза (от 0,36 до 0,9) [59].

Противоречивость требований к условиям, обеспечивающим надежное зрительное восприятие информации от СОИ при использовании прямого и обратного контраста, обусловливает сложность проектирования многокомпонентных СОИ. Как правило, не удается на всех СОИ, расположенных в пределах одного операторского пункта, применить контраст одного типа: прямой или обратный.

Наряду с такими параметрами изображения, как контраст и яркость, существенное влияние на восприятие оказывает время экспозиции изображения. Закон временного (полного) суммирования [43] позволяет приближенно рассчитывать минимальное время, в течение которого зрительное ощущение достигает своего максимального значения, сохраняющегося при более длительных экспозициях на том же уровне. Эта длительность экспозиции называется эффективным временем сохранения зрительного ощущения. Оно обратно пропорционально угловым размерам объекта и яркости фона, на котором воспринимается объект.

Следует учитывать неразрывность в восприятии конфигурации (формы, контуров, очертаний) и цвета всех элементов СОИ. Различные цвета по-разному воспринимаются относительно плоскости, на которую они нанесены, и делятся на выступающие (теплые) и отступающие (холодные). Эта особенность восприятия цвета была использована нами, в частности, при создании мнемосхемы блока ТЭЦ (см. п. 26). Линии основных технологических контуров (пара и воды) были окрашены соответственно в оранжево-красный и желто-зеленый цвета, а вспомогательных контуров (воздуха и дымовых газов) — в голубой и серо-голубой. Основные контуры выглядели при этом намного четче и плотнее, чем вспомогательные.

Несмотря на то, что далеко не все вопросы психологического влияния цвета на человека решены, выявленные закономерности могут служить качественной основой для выбора цветовых решений СОИ. При проектировании последних необходимо учитывать следующие требования и рекомендации.

На СОИ не допускается использование в большом количестве цветов, которые быстро утомляют глаз, таких как красный,

фиолетовый, пурпурный. В качества фона СОИ, имеющих большую площадь, скажем мнемосхем, при использовании общего освещения рекомендуется применять малонасыщенные цвета средней части спектра с относительно большим коэффициентом отражения (50—70%).

Мелкие элементы и детали могут окрашиваться в цвета всех частей спектра, в том числе крайних, но с относительно высоким коэффициентом отражения. Цвета средней части спектра могут иметь среднюю насыщенность и средний коэффициент отражения. Некоторую часть оборудования операторского пункта, находящегося вне рабочего поля зрения оператора, для компенсации утомления цветового зрения следует окрашивать в цвета, дополнительные к основным. На СОИ не должно быть постоянных резких контрастных (по тону и яркости) цветных пятен большой площади.

В зависимости от характера труда операторов предпочтительны цвета, оказывающие требуемое психофизиологическое воздействие. При необходимости поддерживать готовность человека в условиях «информационного голода», монотонности и относительной бездеятельности для окраски СОИ наиболее подходят малонасыщенные нейтральные и теплые цвета с высоким коэффициентом отражения. При выборе цветового решения СОИ необходимо учитывать не только влияние тех или иных цветов на функциональное состояние различных систем организма, но и эмоциональное воздействие на человека всей цветовой композиции.

Цветовой и яркостный контрасты должны выбираться с учетом размеров окрашенных плоскостей. В случае, если необходимо обеспечить одинаковый зрительно воспринимаемый (одновременный) контраст, для больших площадей его абсолютное значение должно быть меньше, чем для малых. Зрительно воспринимаемый контраст между двумя цветными поверхностями может быть снижен, если на границе поверхностей расположить полосу, окрашенную в третий, средний или нейтральный цвет. В ряду сигнальных цветов на СОИ не следует применять оранжевый как предаварийный сигнал наряду с желтым («внимание») и красным («авария»), поскольку оранжевый цвет при пониженной яркости может иногда восприниматься как красный, а при повышенной — как желтый.

По заметности при прочих равных условиях цвета располагаются следующим образом: теплые цвета (цвета длинноволновой части спектра — красный, оранжевый, желтый) замечаются быстрее, чем холодные (зеленый, голубой, синий, фиолетовый), имеющие такие же насыщенность и светлоту; светлые цвета замечаются быстрее, чем темные. Каждый более заметный из пары цветов как бы выступает, приближается зрительно к наблюдателю, он воспринимается чаще как объект по сравнению со вторым, кажущимся несколько удаленным фоном. Однако этот вопрос является одним из сложнейших при организации цветового зрительного восприятия: форма пятен, их размеры, психологическая установка и ассоциации наблюдателя и другие факторы могут существенно изменить характер восприятия.

Спектральный состав и уровень освещенности самым непосредственным образом влияют на восприятие цвета. Максимум цветовой чувствительности глаза приходится при высоких уровнях освещенности (выше 20 лк) на желто-зеленый цвет, а при низких (менее 10 лк) — на зелено-голубой. Этим объясняется известный «эффект Пуркинье» — кажущееся резкое потемнение красно-оранжевого цвета по сравнению с зелено-голубым при низкой освещенности. Важным условием хорошего различения объекта является отсутствие в его окружении пятен, яркость которых значительно превышает яркость объекта; в противном случае в соответствии с законом отрицательной индукции возбуждение от объекта уменьшается и цвет его кажется серым, блеклым и плохо различимым. Для сохранения сосредоточенности внимания оператора необходимо, чтобы фон СОИ был простым и спокойным. Цвета постоянных элементов не должны резко отличаться от цвета фона. Их преобладающие оттенки должны соответствовать общему колористическому решению СОИ.

Отрицательное возбуждающее и раздражающее воздействие отдельных цветов и сочетаний может использоваться как дополнительный стимул для реакции оператора, направленный на устранение нарушений в работе объекта, если между появлением таких цветов на СОИ и событиями на объекте установлено пространственно-временное соответствие.

Эстетические достоинства цветового решения СОИ в первую очередь определяются гармоничностью сочетания всех используемых цветов, всей цветовой схемы. Гармонизация цветовой схемы может быть осуществлена смещением общего цветового баланса в сторону преобладающего на СОИ доминирующего цветового тона. Таковым может быть, например, цвет фона. В этом случае всем цветам придается соответствующий оттенок, что определяет колорит композиции в целом. Единство цветовой схемы может быть достигнуто также путем уравнивания светлот — отражательной способности — всех цветов. Этот способ гармонизации связан с ограничением цветового диапазона. Аналогично осуществляется гармонизация путем уравнивания насыщенности всех цветов. Наиболее общим принципом составления цветовых схем является достижение зрительной сбалансированности, равного привлекающего эффекта всех цветов. Для этого более ярким цветам отводят меньшую площадь, менее ярким — соответственно бóльшую, так чтобы суммарный эффект при их восприятии был выравнен. Гармонизация цветовых сочетаний исследована в психофизиологии цветового зрения весьма слабо; эта область является сейчас еще скорее искусством, чем наукой.

При выборе фактуры покрытий наружных поверхностей СОИ следует учитывать возможность появления блеска при взаимодействии света с отражающей поверхностью. Опыт показывает, что поскольку СОИ обычно имеют сложную форму и разнообразную ориентацию поверхностей, как правило, не удается выбрать такое расположение источников света, которое полностью устранило бы блики на глянцевых поверхностях в поле зрения оператора. Вследствие этого для отделки поверхностей СОИ следует применять матовые и полуматовые материалы и покрытия, имеющие глянец не более 10—15% (по блескомеру ФБ-2).

В качестве примера приведем цветовое решение мнемосхемы блока ТЭЦ-21 Мосэнерго, получившее положительную оценку операторов и специалистов по технической эстетике; оно может использоваться как типовое. Точные характеристики цветов фона мнемосхемы энергоблока, символов агрегатов и технологических линий приведены в табл. 30.

Применение описанных художественно-композиционных приемов позволяет реализовать принцип структурности при проектировании СОИ. Вместе с тем очевидно, что нестрогий, во многом интуитивный характер этих приемов не позволяет получить единственную оптимальную структуру. Возникает задача выбора наилучшей структуры из некоторого набора полученных художественно-конструкторских вариантов.

Характеристики цветов окраски и миемосхемы блока

Окрашиваемые детали мнемосхемы	Характеристика цвета			
	Длина волны, мм	Чистота цвета, %	Коэффициент яркости, %	Марка эмали и цвет
Фои миемосхемы	578	41,0	69,0	МЧ-13 кремовая
Перегретый пар	611,3	89,0	10,3	МЧ-13 красиая
Пар иизких параметров	593,9	25,0	36,8	КЧ-26 розовая
Питательиая вода	546,2	63,0	10,2	ПФ-223 зелеиая
Сетевая и техническая вода	486,6	28,5	4,5	МЧ-13 морской волиы
Коидеисат	520	14,0	48,8	МЧ-13 ярко-зелеиая
Дреиаж	571	47,5	11,3	ПФ-19А зеленая
Газ	583,7	94,5	54,8	МЧ-13 желтая
Мазут	579,5	77,0	11,4	Эмаль 1326 коричневая
Воздух	479,0	19,3	15,7	ЭП-140 голубая
Символы технологического оборудоваиия и агрегатов	572,0	37,5	50,4	НЦ 25 под слоиовую кость
Нижияя приставка к миемосхеме	576	24,0	26,4	НЦ-1175 бежевая

Как мы уже отмечали ранее, один из наиболее общих вариантов постановки задачи оценки вариантов СОИ сводится к сравнению количественных значений критериев успешности решения операторами задач. Если сюда включаются и новые, проблемные задачи, то нередко при этом приходится полагать неизвестными реакции системы на возможные воздействия оператора. Таким образом, процесс управления при решении проблемных задач оказывается совмещенным с накоплением знаний (статистики) о поведении системы. В этом случае задача должна быть отнесена к классу адаптационных, и возможно применение уравнения Беллмана [5] для сравнения тактик поведения операторов при разных вариантах СОИ. Сформулируем известную задачу Беллмана для нашего случая. Пусть оператор в каждый момент времени выполняет одно из двух действий $u_i = f, \overline{f}\,(i = 1, 2, \ldots)$. Внешняя среда (машина) штрафует его единичным штрафом за каждое действие $\overline{f}$ с вероятностью p, за действие f с вероятностью $\overline{p}$. Проводится ряд из Q экспериментов, в которых используются q разных сравни-

тельных вариантов СОИ и решается $\frac{N+\overline{N}}{k}$ проблемных задач ($\bar{k} \gg 1$). Необходимо провести сравнительную оценку вариантов, а также определить по минимальному числу экспериментальных данных теоретически наилучшие показатели адаптации оператора (по наилучшему варианту СОИ). В качестве оценочной характеристики выберем степень оптимальности тактики оператора при решении проблемных задач.

Очевидно, что при известных p и $\bar{p}$ (для совокупности задач — последовательностей действий f и $\bar{f}$, реализованных в опытах) теоретическое значение оптимальной тактики определяется тривиально — по минимуму вероятности штрафа. Более сложно аппроксимировать значение этой оценки на большой период T адаптации оператора, существенно превышающий длительность опытов (t).

Согласно выводам Р. Л. Стратоновича [112], роль достаточных координат для функции S_i, имеющей смысл минимума математического ожидания суммы штрафов за период $T - t$ до полной (условно — до некоторого высокого уровня) адаптации оператора, могут выполнять: n — число штрафов за действие f; N — общее число действий f, $\bar{n}$ — число штрафов за действие $\bar{f}$; $\bar{N}$ — общее число действий $\bar{f}$.

Тогда по формуле Беллмана

$$S_i(n, N, \bar{n}, \bar{N}) = \min \{r_i [1 + S_{i+1}(n+1, N+1, \bar{n}, \bar{N})] +$$
$$+ (1 - r_i) S_{i+1}(n, N+1), \bar{n}, \bar{N}); \; \bar{r}_i [1 + S_{i+1}(n, N, \bar{n}+1, \bar{N}+1) +$$
$$+ (1 - \bar{r}_i) S_{i+1}(n, N, \bar{n}, \bar{N}+1)\},$$

где r_i и $\bar{r}_i$ — апостериорные вероятности штрафов;

$r_i = p[\theta_i = 1 \,|x_i, u_i = f];$

$\bar{r}_i = p[\theta_i = 1 \,|x_i, u_i = \bar{f}];$

x_i — сумма штрафов в момент i;

$x_i = (n_i, N_i, \bar{n}_i, \bar{N}_i);$

$\theta_i = 0; \; 1$ — наблюдаемая величина — штраф в момент i.

Для нестационарного случая, когда изменения p и $\bar{p}$ описываются как марковский (например, диффузионный) процесс, подобная задача решена Р. Л. Стратоновичем [111, 112].

Рассмотрим задачу сравнения n вариантов СОИ, имеющих оценки по N критериям с дискретными значениями из конечного множества оценок (в качестве таких критериев могут быть использованы, например, реальные значения факторов сложности решения оперативных задач K_{jP} и их соотношения с теоретическими значениями K_{jT}). Допустим при этом, что оценки могут иметь качественный характер (варианты наборов оценок: «хорошо—плохо»; «отлично, хорошо, удовлетворительно» и т. д.).

Из предположения, что каждый вариант СОИ может быть оценен по каждому из критериев, следует, что каждый вариант
 СОИ может быть представлен как точка в N-мерном простран-

стве. Возникает задача «упорядочения» вариантов СОИ: определить среди них лучший, следующий за ним и т. д. Для решения задачи необходимо произвести агрегацию оценок — получить общую оценку каждого варианта на основе оценок по отдельным критериям.

В решении подобных задач наиболее широко распространен подход с позиций теории аддитивных полезностей [72, 90]. Этот подход основан на доказательстве теоремы о существовании скалярной однозначной функции $V(X)$ вектора X оценок объекта (в нашем случае — варианта СОИ) по критериям, позволяющей произвести полное упорядочение объектов. Функция $V(X)$ ставит в соответствие каждому объекту скалярную оценку, после чего задача упорядочения решается очевидным образом.

При общем мнении о существовании функции $V(X)$ при любой постановке задачи об упорядочении объектов имеется множество трудносогласуемых мнений и теорий о виде этой функции, т. е. о способе агрегации оценок по критериям.

Подход теории аддитивных полезностей предусматривает введение для каждого из критериев шкалы оценок и определение оценок объектов. Далее определяются взаимоотношения между различными шкалами (или «весами» критериев). Функция $V(X)$ определяется как сумма оценок по критериям, умноженных на соответствующие веса (метод взвешенных сумм).

Наиболее существенный недостаток метода взвешенных сумм заключается в неограниченной возможности компенсации уменьшения качества по одному критерию увеличением качества по другому. Причем среди возможных соотношений могут быть такие, которые неприемлемы с точки зрения «здравого смысла» лица, принимающего решение.

С целью устранения этого недостатка был предложен ряд способов вычисления функции $V(X)$, например, введение нелинейных коэффициентов взаимоотношения между шкалами критериев, основанных на зависимости коэффициентов от самих оценок; введение функций $V(X)$, сильно изменяющихся при малых оценках по отдельным критериям; учет лишь худших оценок по критериям при сравнении объектов и другие. Все эти способы нельзя признать удовлетворительными: первый слишком сложен при большом числе критериев, второй и особенно третий слишком гипертрофируют веса плохих оценок (отдельных недостатков), причем третий способ связан с потерей большого объема фактических данных.

Современный подход к проблеме агрегации оценок состоит в разумном комбинировании методов формальных расчетов с учетом психологических факторов, влияющих на принятие окончательного решения, путем привлечения лица, поставившего задачу и использующего результаты ее решения, для оценки соотношений критериев и при необходимости — при-

влечения дополнительных критериев или модификаций, заданных заранее.

Для рассмотрения таких методов необходимо предварительно классифицировать априорную информацию, характеризующую условия применения тех или иных методов [72].

В зависимости от существования оценок каждого объекта по каждому критерию выделяют ряд возможных ситуаций сравнения этих оценок:

1) ситуация K, когда можно определить соотношения типа «лучше—хуже» для любых оценок различных шкал;

2) ситуация K, когда из-за отсутствия необходимой информации такое соотношение определить невозможно;

3) ситуация J, когда можно определить соотношения типа «лучше—хуже» для интервалов между различными оценками различных шкал;

4) ситуация $\overline{J}$, когда такое сравнение провести невозможно;

5) ситуация I^+, когда каждому критерию приписывается «вес» — число, характеризующее его относительную важность в ряду других критериев;

6) ситуация I^0, когда существует превосходство критериев по важности;

7) ситуация $\overline{I}$, когда не существует никакой возможности сравнения различных критериев.

Перечисленные ситуации составляют при их комбинировании следующие 12 классов априорной информации [134]:

I^+KJ; $I^+K\overline{J}$; $I^+\overline{K}J$; $I^+\overline{K}\,\overline{J}$; I^0KJ; $I^0K\overline{J}$;

$I^0\overline{K}J$; $I^0\overline{K}\overline{J}$; $\overline{I}KJ$; $\overline{I}K\overline{J}$; $\overline{I}\overline{K}J$; $\overline{I}\overline{K}\overline{J}$.

Из случаев, практически интересных для задачи сравнения вариантов СОИ, в настоящее время наиболее подробно изучена ситуация I^0KJ. Рассмотрению этого случая с применением методов линейного программирования частично посвящена работа [9].

Общее требование к сбору субъективной информации сводится к тому, что вопросы, обращенные к лицу, принимающему решения, должны быть типовыми, достаточно простыми, а число этих вопросов и диалогов исследователя с принимающим решения должно быть по возможности минимальным.

Поскольку веса критериев $\pi_1, \pi_2, \ldots, \pi_N$ входят в исходную информацию, может быть образован суммарный критерий:

$$C_\Sigma = \sum_{i=1}^{N} \pi_i C^i.$$

Решение, соответствующее $\max\limits_{X} C_\Sigma$ в области D, есть искомое решение, если по каждому из критериев C^i ($i = 1, 2, \ldots, N$) получены удовлетворительные (по мнению принимающего решение) значения.

Основная процедура состоит из следующих этапов.

1. Исследование области допустимых решений D. Проводится поочередная оптимизация по каждому из критериев C^i. Полученные максимумы образуют вектор Z_1:

$$Z_1 = \begin{vmatrix} \max C^1(X) \\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot \\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot \\ \max\limits_{X \in D} \quad C^N(X) \end{vmatrix}.$$

2. Проводится оптимизация по критерию C_Σ. Полученное решение X_1 характеризуется вектором Y_1, компонентами которого являются значения критериев:

$$Y = \begin{vmatrix} C^1(X_1) \\ \cdot\ \cdot\ \cdot \\ C^N(X_1) \end{vmatrix}.$$

3. Лицу, принимающему решение, задается вопрос: «Все ли компоненты вектора Y_1 имеют удовлетворительные значения?» При ответе должен учитываться вектор Z_1, компоненты которого представляют собой максимально возможные значения компонентов вектора Y_1.

В случае удовлетворительного ответа задача решена. При отрицательном ответе принимающий решение указывает критерий с наименее удовлетворительным значением, а также величину K^ν такую, что при $C^\nu \geqslant K^\nu$ критерий C^ν имеет удовлетворительное решение.

4. Определение новой области допустимых решений путем наложения на прежнюю область D ограничения $C^\nu \geqslant K^\nu$. При новой области повторяется этап 1, в результате чего определяется вектор Z_2.

5. Принимающему решение задается вопрос: «Является ли допустимым переход от вектора Z_1 к вектору Z_2, т. е. уменьшение максимально возможных значений по ряду критериев?» В случае отрицательного ответа он должен изменить принятое ранее как удовлетворительное значение K^ν для критерия C^ν и определить $K_1^\nu < K^\nu$. Далее повторяются этапы, начиная с четвертого. Назначая ряд значений нижних пределов для критерия C^ν, лицо, принимающее решение, ищет компромисс между увеличением значения C^ν и неизбежным понижением максимально возможных значений по одному или нескольким из остальных критериев. В результате выбирается компромиссное значение K_k^ν, которое на дальнейших этапах остается неизменным.

6. Для области допустимых значений с $C^\nu \geqslant K_k^\nu$ проводится оптимизация по критерию C_Σ, которая приводит к определению вектора Y_2. Далее принимающий решение должен ответить на вопрос: «Все ли критерии C^i (компоненты вектора Y_2) имеют удовлетворительное значение?» В случае утвердительного ответа задача решена и Y_2 — искомый результат, иначе повторяются все этапы процедуры, начиная с третьего.

О. И. Ларичев [72] справедливо отмечает, что существенным недостатком методов линейного программирования применительно к решению задачи многокритериального сравнения объектов является невозможность учесть развитие представлений лица, принимающего решение, о весах критериев, их удовлетворительных значениях, расширение существенной информации, не отражаемой в заранее определенных вопросах, и т. п. Необходимо предусмотреть более активное участие принимающего решение в накоплении информации, полезной для сравнения вариантов СОИ.

Таким образом, возникает специальная психологическая задача организации диалога «исследователь—принимающий решение», чтобы максимально объективировать данные, представляемые принимающему решение. Повышение достоверности этих данных имеет, несомненно, большее значение на начальном этапе исследования проблемы сравнения объектов, чем уменьшение числа диалогов «исследователь—лицо, принимающее решение», обсуждаемое в [9]. Вследствие этого проблема сравнения вариантов СОИ, как мы уже отмечали в гл. 1, должна быть переведена в экспериментально-психологический план. Однако при этом возникают сложности с выбором подходящего математического аппарата для планирования таких экспериментов.

Нахождение оптимального числа экспериментов при числе контролируемых факторов K_1, K_2, . . ., K_n при $n > 3$, как известно, весьма затруднительно. Ряд вопросов в этой области успешно решен В. В. Налимовым, Г. К. Кругом и др. В. Н. Пугачев [98] предлагает приближенный метод расчета планов проведения экспериментов типа (i) и (i, k), т. е. с поочередным изменением факторов по отдельности и парами. В нашем случае при изменении структуры СОИ и, следовательно, в опытах по сравнению их вариантов случайным образом изменяется сразу 15 факторов K_{jp}. Для этого случая методов расчета оптимального числа экспериментов нет. В опытах, описанных в гл. 2, мы применили поэтапное проведение экспериментов с оценкой статистических характеристик на каждом этапе и принятием решения о проведении следующего этапа.

Наряду с традиционным аппаратом теории опознания для моделирования процессов восприятия вариантов структуры СОИ мы предложили применять методы математической теории игр [21].

Идея заключается в том, что оператор всегда диагностирует состояние объекта и принимает решение по неполной информации. Следовательно, его взаимодействие с объектом проходит в условиях некоторой неопределенности и может рассматриваться как игра. Начнем с простейшего случая. Допустим, оператор получает сигнал об отклонении режима от нормы. Пусть имеется n параметров, проверка значений которых позволит установить причину отклонения и ликвидировать его одним из n имеющихся способов. Чем быстрее оператор найдет причину, тем быстрее он ликвидирует отклонение. Прибыль от сокращения времени диагностирования, принятия решения и устранения рассогласования определяет величину «выигрыша»; при каждой неудачной попытке — вызове «пустого» параметра или неудачном опережающем действии оператор «платит штраф», определяемый потерей времени и, возможно, дальнейшим ухудшением состояния объекта. Выигрыши и штрафы могут быть в каждом случае оценены количественно и служить основой для сравнения вариантов структуры СОИ.

В общем случае диагностика может проводиться с разным успехом по разным параметрам. Пусть эффективность действия i при диагнозе по параметру j будет a_{ij}. Решение может быть найдено по аналогии с методом Дж. Неймана [87] для исследования нулевой игры двух лиц, эквивалентной задаче оптимального назначения.

Очевидно, простейшей тактикой оператора является перебор всех вариантов, который может быть выражен $n \times n$-матрицей. Эффективность отдельного выбора оператора (перестановки P) равна $\sum_i a_{ii_P}$, где i_P — образ i при перестановке P. Цель оператора состоит в максимизации значения $\sum_i a_{ii_P}$. Перебор $n!$ перестановок явно нерационален.

Решение инвариантно относительно матричного преобразования

$$a_{ij} \to a_{ij} + u_i + v_j,$$

где v_i и v_j — произвольные наборы констант.

Соответственно

$$\sum_i a_{ii_P} \to \sum_i a_{ii_P} + \sum_i u_i + \sum_j v_j.$$

Это имеет существенное значение, так как позволяет при любых (в том числе отрицательных) a_{ij} решать эквивалентную задачу со строго положительными a_{ij}. Для нахождения оптимальной стратегии оператора необходимо найти оптимальную перестановочную матрицу. Ее размеры $2n \times n^2$. Число последовательных шагов для получения достаточно хорошего приближения равно n^m, где m — небольшое положительное число, так что $n^m \ll n!$

В нашем случае одномерный вариант игры будет выглядеть следующим образом: 1) оператор (игрок I) пытается угадать, какой из n параметров определяет ситуацию; 2) параметр (игрок II) скрыт в одном из n сигнальных элементов устройства отображения (с n вызывными номерами). Игра продолжается до нахождения параметра, длительность поиска определяет «выигрыш» оператора («игрока I») — набор положительных чисел α_i. Чем длиннее перебор параметров, тем меньше выигрыш оператора, если же он не успевает предотвратить развивающееся нарушение в заданное время, то начисляется соответствующий «штраф».

Если параметр скрыт в i-м сигнальном элементе с вероятностью x_i, то оператор стремится выбрать такое i, при котором $\alpha_i x_i = \max_i (\alpha_i x_i)$.

Если для некоторого j $\alpha_j x_j < \max (\alpha_i x_i)$, то есть такое $\varepsilon > 0$, при котором $\alpha_j (x_j + \varepsilon) = \max (\alpha_i x_i)$.

Пусть

$$x_i' = \begin{cases} x_j + \varepsilon & \text{для } i = j; \\ x_i & \text{для } i \neq j, \end{cases}$$

тогда

$$\max_i (\alpha_i x_i') = \max_i (\alpha_i x_i)$$

и

$$\sum_i x_i' = \sum x_i + \varepsilon = 1 + \varepsilon.$$

Очевидно, величины x_i могут быть интерпретированы как вероятности, причем

$$\max_i (\alpha_i x_i'') = \frac{\max_i (\alpha_i x_i')}{1 + \varepsilon} < \max_i (\alpha_i x_i).$$

21*

Отсюда видно, что стратегия «игрока II» (параметра) $x = (x_i')$ не является оптимальной. Наиболее трудным для оператора будет случай

$$\alpha_1 x_1 = \alpha_2 x_2 = \ldots = \alpha_j x_j = \max_i (\alpha_i x_i) = A.$$

Из вероятностной интерпретации x_i следует $\sum_i x_i = 1$.

Значение игры для оператора выражается как

$$A = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{\alpha_i}}.$$

Теперь предположим, что мы построили СОИ в виде набора табло, причем для диагностирования ситуации оператору достаточно нажать кнопку, соответствующую столбцу или строке (вертикальному или горизонтальному ряду табло $n \times n$-матрицы), содержащим необходимую для уточнения обстановки информацию. Такая задача относится к разряду двумерных неймановских игр. Перенумеруем табло парами индексов i, j ($i, j = 1, \ldots, n$). Выигрыш оператора обозначим через α_{ij} ($\{\alpha_{ij}\}$ — заданное множество положительных чисел).

Очевидно, на поиск из n^2 возможных табло (чистых стратегий игрока II) оператор («игрок I») имеет 2 чистые стратегии.

Исследуем свойства оптимальных стратегий игрока II. Пусть его смешанной стратегией будет $x = (x_{ij})$, так что $\sum_{ij} x_{ij} = 1$, где x_{ij} — вероятность нахождения искомого табло в ячейке с координатами i, j.

При выборе оператором строки i или столбца j чистые стратегии принесут ему соответственно выигрыши $\sum_j \alpha_{ij} x_{ij}$ или $\sum_i \alpha_{ij} x_{ij}$.

Значение антагонистической игры (стремление игрока I к максимальному выигрышу и игрока II — к его минимизации) будет

$$\min_x \max_{i', j'} \left(\sum_j \alpha_{i'j} x_{i'j}, \sum_i \alpha_{ij'} x_{ij'} \right).$$

Исследование вариантов нахождения табло теперь явно сложнее, чем в одномерной (предыдущей) задаче. Нейман для решения использовал некоторые методы высшей геометрии.

Обозначим R — множество всех n^2-мерных векторов $Z = (z_{ij})$ таких, что

$$z_{ij} \geqslant 0; \quad \sum_j z_{ij} = 1; \quad \sum_1 z_{ij} = 1,$$

S — множество всех таких n^2-мерных векторов $Z = (z_{ij})$, что

$$z_{ij} \geqslant 0; \quad \sum_j z_{ij} \leqslant 1; \quad \sum_i z_{ij} \leqslant 1,$$

а T — множество всех n^2-мерных векторов $Z = (z_{ij})$, таких что $z_{ij} = \delta i^P j$, где P — некоторая перестановка чисел $1, 2, \ldots, n$, т. е. T состоит из совокупности всех перестановочных $n \times n$-матриц. Дальнейшее доказательство основано на двух леммах:

1) S совпадает с множеством всех таких Z, что $0 \leqslant Z \leqslant \omega$ для некоторого $\omega \in R$;

2) R совпадает с выпуклой оболочкой T.

Пусть для оператора наиболее трудны случаи расположения искомых табло $X = (x_{ij})$:

$$z_{ij} = \frac{\alpha_{ij} x_{ij}}{A}.$$

Очевидно, что $\sum_j \alpha_{ij} \leqslant A$ и $\sum_i \alpha_{ij} x_{ij} \leqslant A$ при всех i и j. Следовательно, $\sum_j z_{ij} \leqslant 1$ при всех i и $\sum_i z_{ij} \leqslant 1$ при всех j. Отсюда $Z = (z_{ij})$ принадлежит множеству S.

Пользуясь леммами, получим

$$\omega_{ij} = \frac{\alpha_{ij} u_{ij}}{A}; \quad u = (u_{ij});$$

$$\sum_j \alpha_{ij} u_{ij} = A \sum_j \omega_{ij} = A; \ \sum_i \alpha_{ij} u_{ij} = A \sum_i \omega_{ij} = A.$$

Отсюда

$$\max_{i', j'} \left(\sum_i \alpha_{i'j'} u_{i'j}; \ \sum_i \alpha_{ij'} u_{ij'} \right) = A.$$

Поскольку $z_{ij} \leqslant \omega_{ij}$ и $x_{ij} \leqslant u_{ij}$, то

$$\sum_{i,j} x_{ij} \leqslant \sum_{i,j} u_{ij}; \quad \theta = \frac{\sum_{i,j} x_{ij}}{\sum_{i,j} u_{ij},} \leqslant 1.$$

Пусть $v_{ij} = \theta u_{ij}$, тогда $\sum_{i,j} v_{ij} = \sum_{i,j} x_{ij} = 1$, т. е. и $\{v_{ij}\}$ и $\{x_{ij}\}$ могут быть интерпретированы как вероятности:

$$\max_{i', j'} \left(\sum_j \alpha_{i'j} v_{i'j}; \ \sum_i \alpha_{i,j'} v_{ij'} \right) = \theta A.$$

Из оптимальности $X = (x_{ij})$ следует $\theta = 1$ и $\sum_{i,j} x_{ij} = \sum_{i,j} u_{ij}$, откуда $Z = \omega \in R$.

Согласно лемме 2, Z является центром тяжести некоторых точек из множества T, т. е.

$$Z = \sum_\nu t_\nu Z^\nu; \quad Z^\nu \in T;$$

$$\sum_\nu t_\nu = 1; \quad t_\nu \geqslant 0; \quad Z_{ij}^\nu = \frac{\alpha_{ij} x_{ij}^\nu}{A}.$$

Из оптимальности стратегии x следует оптимальность производных стратегий x, поэтому $Z_{ij} = \delta_i P^\nu$, где P — соответствующая перестановка. Значит,

$$x_{ij}^\nu = \frac{A}{\alpha_{ij}} \delta_i P_j^\nu.$$

Таким образом, все наиболее сложные для оператора случаи расположения искомых табло совпадают с центрами тяжести оптимальных стратегий специального вида

$$x_{ij} = \frac{A}{\alpha_{ij}} \delta_{iP_j}.$$

Эти варианты должны быть исследованы особенно тщательно. Для каждого из них $\sum_j \alpha_{ij} x_{ij} = A$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$ и $\sum_i \alpha_{ij} x_{ij} = A$ $(j = 1, 2, \ldots, n)$. Следовательно,

$$\max_{i', j'} \left(\sum_j \alpha_{i'j} x_{i'j};\ \sum_i \alpha_{ij'} x_{ij'} \right) = A.$$

Из предположения, что $x_{ij'}$ — вероятности, следует

$$\sum_{i, j} x_{ij} = 1 \text{ и } \frac{\sum A}{\alpha_{iiP}} = 1; \quad A = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{\alpha_{iiP}}},$$

т. е. наиболее сложные для оператора случаи, приводящие к наибольшим потерям, получаются при тех перестановках $n \times n$-матрицы, при которых $\sum_i \frac{1}{\alpha_{iiP}}$ достигает максимума.

Интересный вариант практической реализации описанной нами матричной игры оператор — СОИ (объект) предложен Ю. А. Ивашкиным. Им разработано табло матричного типа [62].

Весьма эффективным оказалось также применение теоретико-игрового подхода совместно с методами теории опознания к исследованию процессов классификации человеком оперативных задач и состояний объекта по различным вариантам информационной модели, т. е. по различным по составу или компоновке комбинациям выборочных признаков — контролируемых параметров объекта.

Классификация оперативных ситуаций может быть сведена, подобно задаче распознавания, к нахождению дискриминантных функций или разделяющих поверхностей. Ситуации рассматриваются заданными в виде координат $(x^1, x^2 x^3, \ldots, \ldots, x^m)$ m-мерного евклидова пространства E_m, где x^i, $i = 1, \ldots, m$ — признаки ситуаций. Пространство $X = (x^1, x^2, \ldots, x^m, 1)$ называется расширенным пространством признаков.

В случае линейной попарной разделимости любых двух классов ситуаций разделяющей поверхностью будет гиперплоскость $WX = 0$, где $W = (\omega_1, \ldots, \omega_{m+1})$; $X = (x^1, x^2, \ldots, x^m, 1)$ или $g_1(X) - g_2(X) = 0$, где $g_1(X)$, $g_2(X)$ — линейные дискриминантные функции.

Допустим, нам известно некоторое множество ситуаций

$$X_i = \left(x_i^1, x_i^2, \ldots, x_i^m, 1\right), \ i = 1, 2, \ldots, n,$$

так что ситуации X_i, $i = 1, 2, \ldots, k$ принадлежат одному классу, а X_i, $i = k + 1, \ldots, n$ — другому, т. е.

$$WX_i > 0, \ i = 1, \ldots, k; \ WX_i < 0, \ i = k + 1, \ldots, n.$$

Тогда под обобщением способа классификации ситуаций понимается нахождение вектора $W = (\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_{m+1})$ по исходному множеству ситуаций.

Задача линейной разделимости множества ситуаций на два класса в случае, когда возможные значения каждого признака принимаются за 0 или 1, сходна с задачей реализуемости логических функций на одном пороговом элементе, впервые решенной Акерсом [129]. На основе этой работы Акерса Б. Н. Панайоти, Л. Я. Пьянзина и В. А. Чебаков [93] дополнили предложенный нами игровой подход к исследованию процессов распознавания оператором различных ситуаций, возникающих на объекте.

Кроме неймановских игр размерности $n \times m$ они рассматривают матричную игру с матрицей выигрышей $C = [c^i{}_j]$ размерности $(2m + 2) \times n$, составленной так, что каждой строке соответствует некоторый признак расширенного пространства ситуаций из имеющегося предварительно множества (со знаком «плюс» для первого класса ситуаций и «минус» — для второго), каждому столбцу — некоторая ситуация из этого же множества

$$C = \begin{vmatrix} x_1^1 & \dots & x_k^1 & -x_{k+1}^1 & \dots & -x_n^1 \\ x_1^2 & \dots & x_k^2 & -x_{k+1}^2 & \dots & -x_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^m & \dots & x_k^m & -x_{k+1}^m & \dots & -x_n^m \\ 1 & \dots & 1 & -1 & \dots & -1 \\ -x_1^1 & \dots & -x_k^1 & x_{k+1}^1 & \dots & x_n^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -x_1^m & \dots & -x_k^m & x_{k+1}^m & \dots & x_n^m \\ -1 & \dots & -1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}$$

Стратегии оператора («игрок I») — это строки матрицы (признаки ситуаций), стратегии объекта («игрок II») — столбцы матрицы (ситуации). Суть игры остается такой же, как и в задаче, описанной выше. Значение игры с приведенной матрицей выигрышей

$$V = \sum_{i=1}^{2m+2} \sum_{j=1}^{n} a_i c_j b_j ,$$

где векторы

$$A = (a_1, \dots, a_{2m+2}), \ \sum_{i=1}^{2m+2} a_i = 1, \ a_i \geqslant 0, \ i = 1, \dots, 2m + 2,$$

$$B = (b_1, \dots, b_n), \ \sum_{j=1}^{n} b_j = 1, \ b_i \geqslant 0, \ j = 1, \dots, n$$

соответствуют оптимальным смешанным стратегиям игроков I и II соответственно.

В этом случае к классификации оперативных задач (ситуаций), отображаемых на СОИ, применима теорема о критерии линейной разделимости распознаваемых объектов [93]. Два несовместных класса оперативных ситуаций, характеризуемых отображаемыми на СОИ m признаками, линейно разделимы тогда и только тогда, когда значение матричной игры с матрицей выигрышей C есть величина положительная. При этом разделяющая гиперплоскость

$$WX = \sum_{i=1}^{m} (a_i - a_{i+m+1})\, x^i + (a_{m+1} - a_{2m+2}) = 0,$$

а дискриминантные функции

$$g_1(X) = \sum_{i=1}^{m} a_i x^i + a_{m+1}; \quad g_2(X) = \sum_{i=1}^{m} a_{i+m+1} x^i + a_{2m+2}.$$

В настоящее время для исследования на ЭВМ процессов классификации методами теории игр имеются достаточно полные алгоритмы, например, на языке Алгол-60 [93].

Резюмируя этот раздел, следует отметить, что реализация одного из важнейших принципов построения многокомпонентных СОИ — принципа структурности требует широкого применения неформальных художественно-композиционных приемов. Дальнейшая оценка вариантов структуры информационной модели должна производиться экспериментально-психологическими методами с приближенным поэтапным планированием опытов и комбинированным использованием аппарата теории опознания и математической теории игр для формализации некоторых частных случаев задачи классификации человеком-оператором состояния управляемого объекта по его неполному отображению на информационных моделях.

Глава

10

Практика художественного конструирования систем отображения в АСУ ТП

26

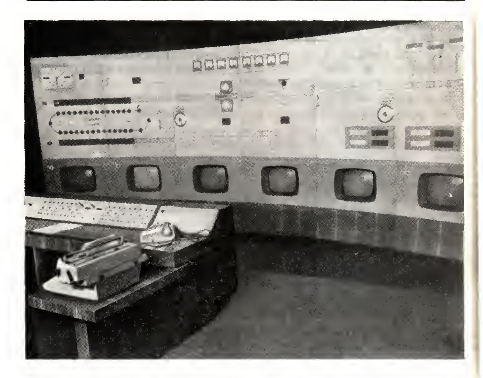
Практическое применение психологических принципов компоновки мнемосхем

В гл. 4 на основе анализа факторов, статистически обусловливающих сложность решения оперативных задач, был сформулирован ряд психологических принципов компоновки СОИ, направленных на снижение реальных значений этих факторов. Здесь мы коротко рассмотрим на нескольких примерах из нашего опыта вопросы применения указанных принципов в практике художественного конструирования мнемосхем.

Поскольку применение принципа оптимальной лаконичности рассматривалось достаточно подробно в п. 8 на примере отбора наиболее представительной информации для вынесения на мнемосхему объединенной энергосистемы Урала, здесь мы этого принципа касаться почти не будем.

Наиболее просто принципы компоновки реализуются при построении мнемосхем однопоточных (однолинейных) технологических процессов. Примером может служить спроектированная в руководимой автором лаборатории мнемосхема слябинга 1150 для металлургического комбината им. Г. Георгиу-Деж в румынском городе Галац (см. фото на рис. 43), предназначенная для централизованного диспетчерского управления технологическим процессом с применением информационной вычислительной машины, системы сигнализации и телевизионной промышленной установки.

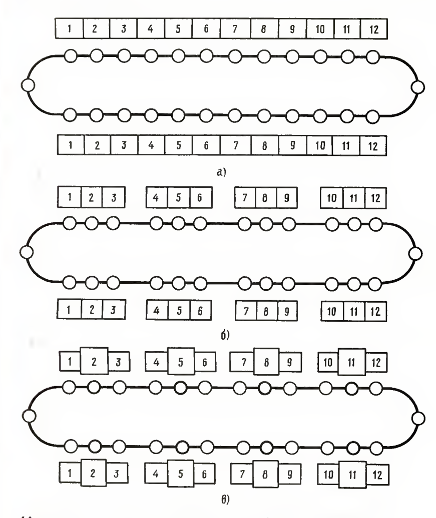
Структурную ось мнемосхемы составляет цепь рольгангов слябинга. Технологический комплекс на мнемосхеме четко разделяется на ряд относительно автономных узлов, последовательно соединенных техпроцессом: слева блок нагревательных колодцев с системой слиткоподачи, далее обо-



43 *Мнемосхема и пульт слябинга 1150*

собленно друг от друга расположены символы весов для взвешиваиия слитка, обжимиых валков, маркировочиого пресса, иожииц, весов для взвешиваиия обработаииого слитка и блока траиспортировки продукции. Соответствеиио изображеииям узлов на мнемосхеме в нижней части щита расположеиы телевизиоииые моииторы, с помощью которых оператор может визуальио воспринимать детальиую иифформацию об этих узлах. При выборе миемосимволов использовались наглядиые ассоциации их с внешним видом и главиое — функцией отображаемых агрегатов. В процессе разработки проекта был выполнеи ряд исследовательских макетов миемосхемы.

При создании мнемосхем подобных однопоточных технологических комплексов легко реализуется и принцип стадийности: последовательно расположенные агрегаты соответствуют последовательным стадиям управляемого технологического процесса. Для облегчения диспетчеру решения различных задач группы контрольно-измерительных приборов и сигнальных табло, соответствующие решению типичных задач, расположены обособленно. На мнемосхеме четко выделены основные элементы контроля и управления техпроцессом, изъяты несущественные конструктивные детали агрегатов, символы сходных деталей обобщены и унифицированы.



44 *Чередование символов нагревательных колодцев на мнемосхеме*:

а — метрическая последовательность; *б* — ритмическая последовательность; *в* — ритмическая последовательность с выделением

В тех случаях, когда в функции диспетчера входит непосредственное управление процессами нагрева и подачи слитков, вместо метрической последовательности символов нагревательных колодцев, примененной в данном случае, на мнемосхемах металлургических станов следует вводить ритм с выделением групп символов (рис. 44), что значительно облегчает ориентировку в схеме этого узла. Для того чтобы диспетчер слябинга мог со своего фиксированного рабочего места за пультом не только получать всю необходимую информацию, но и соответственно ей влиять на технологический процесс, мы предложили в пульт встроить передающую телевизионную камеру для передачи на телевизионные мониторы, установленные на местных постах управления, технологических карт и рекомендаций по изменению режима.

Теперь перейдем к вопросам построения мнемосхемы более сложного (многопоточного, многосвязного) объекта — энергетического блока, автоматизированного с применением управляющей вычислительной машины (УВМ).

Эта работы интересна вследствие специфики и перспективности организации оперативного управления блоком, масштабом задач, в том числе исследовательских, системных, методических, художественно-конструкторских и эргономических. Кроме того, ставилась задача разработать вариант методики комплексного подхода к выбору характеристик и конструированию СОИ для подобных АСУ ТП. В основу методики была положена последовательность этапов разработки СОИ, изложенная выше.

К информационной системе энергоблока был предъявлен ряд общих требований. СОИ должно в наиболее наглядной форме представлять оператору информацию о состоянии управляемого объекта, всех важных переключениях, производимых УВМ. Анализ достаточности информации для выполнения этих функций оператором изложен в [21]. СОИ должно быть построено так, чтобы освободить оператора от необходимости постоянного напряженного слежения за показаниями приборов и в то же время поддерживать на высоком уровне его готовность включиться в управление при сбое УВМ. СОИ должно также облегчить использование оператором примененных на блоке избирательных систем контроля и управления. Основные требования, очевидно, связаны с решением проблемы оптимального кодирования информации (выбор уровня обобщения информации, категорий и алфавита кодирования) для облегчения оператору ее расшифровки и соотнесения с состоянием реального управляемого дистанционно объекта с целью диагностирования ситуации, принятия решения, планирования операций, выбора наиболее эффективного способа действия и т. п.

В технологический блок, которым управляет один оператор, входит очень большой объем оборудования: два котлоагрегата производительностью по 480 т пара в час, два теплофикационных турбогенератора мощностью по 100 тыс. кВт, четыре пиковых водогрейных котла и вспомогательное оборудование, обслуживающее данный энергоблок и электростанцию в целом. Столь высокая централизация оперативного управления была применена на ТЭЦ-21 Мосэнерго впервые в мировой практике энергетики.

При разработке системы комплексной автоматизации ТЭЦ выяснилось, что с помощью УВМ целесообразно автоматизировать только оборудование главного корпуса, которое охватывает весь основной технологический процесс выработки электрической и тепловой энергии. Вспомогательное оборудование целесообразно автоматизировать с помощью обычных автономных средств контроля и управления и вынести информацию о его состоянии на отдельную панель (на рис. 48 она показана справа от оператора).

Основным звеном в системе автоматизации технологического оборудования главного корпуса ТЭЦ является управляющая вычислительная машина, применение которой вносит коренное, качественное изменение в организацию управления станцией. Это обусловливается тем, что на УВМ возлагается значительная часть функций, которые при обычных средствах управления и регулирования выполняются обслуживающим персоналом.



45 *Операторский пункт энергоблока ТЭЦ-21 Мосэнерго*

В функции УВМ входят сигнализация и регистрация отклонений параметров от заданных значений, вычисление и регистрация технико-экономических показателей работы блока, автоматическое регулирование тепловых процессов с оптимизацией режимов работы оборудования, автоматические пуск и остановка агрегатов. С помощью УВМ осуществляются контроль параметров на цифровых приборах по вызову оператора и регистрация параметров.

В функции оператора блока входят контроль за работой и управление тепломеханическим оборудованием, расположенным в главном корпусе ТЭЦ, а также вспомогательным общестанционным оборудованием.

В нормальных условиях управление осуществляется УВМ. В случае появления отклонения какого-либо технологического параметра от заданного значения от УВМ подается сигнал на СОИ. Оператор квитирует сигнализацию (отключает звонок и переводит нажатием кнопки сигнал с мигания на ровное свечение) и набирает номер отклонившегося параметра на наборном поле, затем нажимает кнопку подключения выхода информационной части УВМ к одному из цифровых избирательных приборов. При протекании переходного процесса в агрегате каждые 2 с на приборе появляется новая величина, соответствующая мгновенному значению параметра. Если окажется, что отклонение увеличивается, т. е. УВМ почему-либо не справляется с задачей восстановления нормального режима, оператор берет ее решение на себя.

На мнемосхему помимо информации о состоянии блока вынесена также сигнализация состояния самой УВМ. Таким образом, в комплекс оборудо-

вания, за функционированием которого следит оператор, входит кроме основного технологического объекта и управляющая вычислительная машина.

В случае сбоя в работе и отключения УВМ оборудование блока остается в состоянии, предшествовавшем этому моменту. Оператор приступает к выполнению функций управления и контроля с помощью избирательной системы управления и контроля, резервной системы автоматического регулирования, автономных приборов контроля, а также сигнализации состояния органов управления и механизмов на мнемосхеме. Перед оператором в этом случае ставится задача безаварийного ведения базового (постоянного) режима, блок освобождается от участия в ведении диспетчерского графика энергетического района. Не соблюдается и требование оптимизации процессов. Наиболее важно при этом обеспечить надежную работу блока. Эти условия работы оператора должны приниматься во внимание в первую очередь при разработке СОИ и пульта управления.

Применение избирательной системы управления дает оператору возможность управлять большим количеством исполнительных механизмов с помощью минимального количества ключей, расположенных на пульте.

На центральной секции пульта управления блоком размещено семь цифронаборных полей и органов управления избирательной системы управления. Сочетание избирательной и индивидуальной систем управления обосновано для данного случая результатами специальных психологических экспериментов.

Как было выявлено в гл. 2, существенное влияние на эффективность решения оперативных задач оказывает фактор, определяемый числом операций при реализации принятого решения. Анализ деятельности операторов различных технологических объектов (электростанций, химических комбинатов [21]) показал, что в тех случаях, когда на пульте установлено 300—400 индивидуальных органов управления механизмами и агрегатами объекта, время поиска нужных органов занимает значительную долю общего времени решения оперативных задач, на эту ответственную стадию приходится немало ошибок. В исследовавшихся случаях влияние фактора $K_{бр}$ значительно выше, чем в проводившихся экспериментах, где испытуемые, приняв решение, только перечисляли команды по изменению состояния органов управления и агрегатов (см. гл. 2).

Снижение влияния фактора $K_{бр}$ может быть осуществлено двумя основными способами: рационализацией размещения органов управления и уменьшением их числа.

Первый способ может быть оценен, например, по результатам реконструкции пультов аммиачного производства Щекинского химического комбината: время устранения аварийных нарушений после внедрения нашего проекта реконструкции уменьшилось в среднем на 15% [33].

Второй способ был реализован посредством замены индивидуальной системы управления избирательной.

В избирательной системе любой из исполнительных механизмов может управляться одним органом управления, установленным на пульте. Избирательное подключение механизма к органу управления производится с помощью вызывного устройства, например клавишного номеронабирателя. Нажатием кнопок номеронабирателя, которые соответствуют номе-

рам механизмов, обозначенных на мнемосхеме, можно вызывать поочередно до 99 механизмов.

Избирательные системы управления, появившиеся более 10 лет назад и установленные, в частности, на пункте управления ТЭЦ-21 [21], еще не вышли из статуса опытно-экспериментальных, поскольку нет единства взглядов относительно эффективности их применения и не было проведено их инженерно-психологической оценки в сравнении с традиционными индивидуальными системами управления. Дело в том, что избирательная система несколько усложняет структуру исполнительных действий оператора. При управлении по вызову она представляет следующую последовательность: 1) найти условное обозначение органа управления на мнемосхеме; 2) набрать номер; 3) по сигнализации на мнемосхеме проверить правильность вызова; 4) с помощью ключа управлять исполнительным механизмом.

В обычной индивидуальной системе достаточно двух действий: найти на пульте управления нужный орган и с его помощью управлять соответствующим механизмом. Все дело в том, что найти в индивидуальной системе орган среди 300—400 подобных ему на пульте, как правило, нелегко.

Сравнение индивидуальной и избирательной систем управления проводилось на примере оперативных задач (решаемых оператором блока ТЭЦ), описанных в гл. 2. Критериями сравнительной оценки служили время решения испытуемыми оперативных задач и число допущенных ошибок.

В состав экспериментальной установки входили: мнемосхема агрегатов электростанции с сигнализацией состояния технологических параметров и положения органов управления (на рис. 2 показан фрагмент — мнемосхема сетевых подогревателей); пульт управления с ключами индивидуальной и избирательной систем управления; аппаратура фиксации времени решения задач; пульт экспериментатора с программно-командной аппаратурой.

С точки зрения исполнительных действий использовавшиеся оперативные задачи разбиты на три группы:

1) задачи, требующие в ответ на сигнал быстро выполнить одно переключение органа управления (задачи на «предотвращение аварии»);

2) задачи, в которых должна быть выполнена цепочка переключений (например, пуск агрегатов — задача 1, см. п. 4);

3) задачи на изменение режимов, когда необходимо переключать органы управления, влияющие на различные параметры (например, задачи 2, 5, 8).

Как и в п. 13, в данном случае также были проведены по методу В. И. Николаева [89] предварительные расчеты ожидаемого соотношения времени, затрачиваемого испытуемыми на решение экспериментальных задач в двух сравниваемых вариантах.

В расчетах учитывались только те компоненты общих временных затрат оператора, которые непосредственно зависят от типа применяемой системы управления — время поиска средств реализации решения $t_{пр}$ и время реализации решения $t_{рр}$. Взяты средние показатели решения по задачам второй группы сложности.

При использовании избирательной системы управления $\bar{t}_{пр} = 1,0$ с, при доверительной вероятности $p = 0,95$

$0,88 < t_{пр} < 1,12$ с; $\bar{t}_{рр} = 2,07$ с; $2,03 < t_{рр} < 2,10$ с.

При использовании индивидуальной системы управления

$t_{пр} = 3,65$ с; $3,36 < t_{пр} < 3,78$ с;

$t_{рр} = 0,85$ с; $0,75 < t_{рр} < 0,95$ с.

Средняя ожидаемая разность временных затрат при использовании избирательной и индивидуальной систем управления составляет $\Delta t_0 = 1,43$ с. Доверительная вероятность преимущества избирательной системы перед индивидуальной по суммарным временным показателям $p = 0,95$.

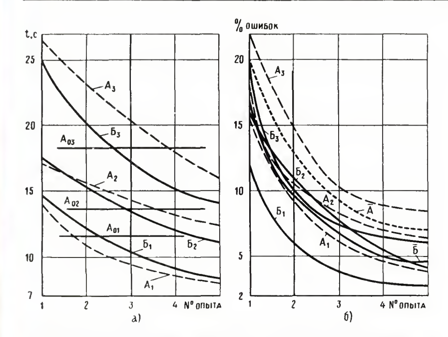
Теперь обратимся к экспериментальным данным.

Эксперименты модифицировались по числу органов управления объектом и по расположению органов на пульте относительно размещения их символов на мнемосхеме. Поскольку набор этих задач в опытах был намного меньше, чем на реальном объекте — всего 20, испытуемые после некоторого числа экспериментов, в которых задачи повторяются, обучаются реагировать на сигналы почти автоматически. При этом время решения задач с помощью сравниваемых систем управления неуклонно уменьшается, и после определенного периода обучения различия становятся уже несущественными. Контрольные замеры показателей работы испытуемых должны производиться на том этапе экспериментов, когда уровень их обученности соответствует квалификации реального оператора моделируемого объекта. Необходимо определить, в какой экспериментальный день это произойдет. Подобная задача планирования экспериментов имеет достаточно широкое значение для инженерно-психологических исследований. Чтобы определить контрольное время решения экспериментальных задач в лабораторных условиях, к опытам были привлечены квалифицированные операторы с электростанции. Контрольная серия экспериментов позволила определить среднее время решения задач указанных выше трех групп опытными операторами при избирательной системе управления (именно эта система используется на электростанции):

$$t(A_{O1}) = 10,5c;\ t(A_{O2}) = 13,3c;\ t(A_{O3}) = 18,2c.$$

Полученные экспериментальные данные представлены в виде графиков зависимости показателей эффективности решения задач каждой группы в ходе обучения (по экспериментальным дням) для сравниваемых систем управления (рис. 46, *а*).

На рис. 46, *б* показано число ошибочных действий испытуемых (в процентах) при решении задач первой, второй и третьей групп по экспериментальным дням. Усреднение данных производилось с учетом относительного «веса» каждой группы задач, определяемого частотой аналогичных ситуаций на реальном объекте и потерями от ошибок при их устранении.



46 *Результаты сравнения индивидуальной (А) и избирательной (Б) систем управления по группам задач (A_i, $Б_i$) и средним показателям ($\bar{A}$, $\bar{Б}$):*

A_{O1}, A_{O2}, A_{O3} — среднее время решения задач опытными операторами; $\bar{A}$ и $\bar{Б}$ — средневзвешенные значения; *а* — сравнение по времени решения; *б* — сравнение по числу ошибок

На рис. 46, *а* линии A_{O1}, A_{O2}, A_{O3} — это результаты решения задач трех групп опытными операторами, что соответствует среднему уровню их обученности. Искомый контрольный день определялся по минимуму сумм разностей $\sum_{i=3}^{3} \Delta i\,(m)$, где $\Delta i = |A_i - A_{Oi}|$ — абсолютное значение разности во времени решения задач испытуемыми и опытным оператором; m — порядковый номер экспериментального дня ($m = 1 \div 5$); i — группа задач ($i = 1,\ 2,\ 3$).

Подсчет показал, что для второго дня $\sum_{1}^{3} \Delta i\ (2) = 3{,}8$ с; для третьего дня $\sum_{1}^{3} \Delta i\ (3) = 2{,}5$ с; для четвертого дня $\sum_{1}^{3} \Delta i\ (4) = 7{,}2$ с.

Для первого и пятого дней эти разности существенно больше. Наименьшая разность средних показателей получилась для третьего экспериментального дня. Таким образом, показатели эффективности действий испытуемых с индиви-

дуальной и избирательной системами управления сравнивались по данным третьего экспериментального дня (см. рис. 46).

При решении оперативных задач первой группы индивидуальная система имеет некоторые преимущества перед избирательной по времени решения.

При решении задач второй группы, наоборот, «более быстрой» оказалась избирательная система, хотя различие во времени в относительных единицах вдвое меньше, чем для первой группы.

Применительно к задачам третьей группы избирательная система значительно сокращает время решения. Количество ошибок, допускаемых испытуемыми, для избирательной системы меньше, чем для индивидуальной системы управления. Это объясняется, видимо, тем, что при использовании избирательной системы оператор выполняет подготовительное действие — вызов органа управления. Кроме того, контроль правильности вызова по мнемосхеме почти исключает ошибки из-за спутывания различных органов управления. Показатели работы с избирательной системой более стабильны: они меньше зависят от структуры и уровня сложности задач.

На основании результатов экспериментов могут быть сделаны следующие выводы.

1. При небольшом числе органов управления на пульте (до 30) избирательная система практически не дает выигрыша в эффективности действий оператора по сравнению с индивидуальной.

2. Для одиночных переключений в ответ на экстренные сигналы следует применять индивидуальные ключи (например, для аварийного отключения агрегатов), компоновка которых на пульте строго соотносится с положением их символов на щите либо непосредственно объединена изображенной на пульте оперативной микромнемосхемой.

3. Для решения сложных задач, связанных с оценкой и диагностированием ситуации и выполнением цепи переключений при оптимизации режимов с невысокой скоростью переходных процессов (постоянная времени более 1 мин), следует применять избирательные системы управления.

4. На пультах сложных объектов целесообразно комбинировать индивидуальную и избирательную системы управления, используя первую для немногочисленных (до 30) наиболее ответственных исполнительных механизмов, предназначенных для аварийного отключения агрегатов или регулирования быстропротекающих процессов.

5. При числе исполнительных механизмов больше 10—15 избирательная система управления, занимающая гораздо меньше места, позволяет максимально использовать оптимальную моторную зону оператора.

Выводы данной экспериментальной серии были практически проверены не только на примере пульта управления блоком

ТЭЦ-21 Мосэнерго, где комбинировались избирательная и индивидуальная системы управления, но и на примере пульта управления цехом Воскресенского химкомбината, на котором органы управления смешанного типа — избирательные и индивидуальные — непосредственно встроены в оперативную микромнемосхему. В обоих случаях было достигнуто повышение скорости и точности реализации оператором принятых решений.

Если в ходе управления энергоблоком ТЭЦ-21 какой-либо параметр отклонился, но УВМ в общем исправна, оператор с помощью вызывной системы управления лишь вносит коррекцию в работу того или иного контура регулирования УВМ. Нажатием кнопки «Р» на вызывном поле оператор может подключить орган управления, номер которого набран, к резервному регулятору, нажатием кнопки «М» вновь подключить его к выходу УВМ. Оператор блока управляет по вызову более чем 400 органами управления с помощью избирательной системы. Кроме того, на пульте расположено 48 индивидуальных ключей, предназначенных для управления наиболее ответственными механизмами, ликвидации аварий и ввода команд в УВМ.

Опыт эксплуатации блока и анализ работы операторов показали, что избирательная система управления в том виде, в котором она применена на ТЭЦ-21, со специально разработанными мнемоническими элементами, отражающими номера, местоположение и состояние органов управления, обеспечивает оператору достаточно высокую наглядность при выполнении переключений и не уступает в этом смысле системам, в которых индивидуальные ключи не встроены в мнемосхему технологического объекта, а расположены на пульте.

Однако следует признать, что избирательная система этого типа (с цифронаборными полями) менее наглядна, чем штекерная, примененная в проекте пульта управления цехом обжига Воскресенского химкомбината, разработанном руководимой автором лабораторией ВНИИТЭ совместно с ЦНИИКА. На рабочей панели пульта расположена микромнемосхема, и, таким образом, сенсорное и моторное поля совмещены [21].

Кроме того, необходимо иметь в виду, что при надежной работе УВМ оператор не участвует в управлении, а при ее сбоях держит блок в базовом режиме. И, наконец, как показали эксперименты, человек допускает меньше ошибок, если выполнению операций предшествуют дополнительные действия.

Собственную надежность избирательной системы управления и надежность оперирования ею человеком, исходя из накопленного опыта эксплуатации ТЭЦ-21, можно оценить как вполне удовлетворительную. В то же время избирательная система управления повысила удобства работы оператора, позволив на метровой средней панели пульта разместить органы управления почти 500 механизмами. При применении индивидуальных ключей потребовался бы пульт значительно большей протяженности (около 12 м).

После составления подробной характеристики управляемого объекта и функций оператора, формулировки проектной задачи, в том числе основных требований к СОИ, был, как обычно, проведен анализ состояния подобного рода работ. Обзор показал, что мнемосхемы на крупных ТЭЦ, автоматизированных с применением УВМ, ранее не применялись, таким образом, для ТЭЦ-21 выполнялась принципиально новая разработка.

Для иллюстрации сложности такой задачи приведем некоторые количественные характеристики системы сигнализации блока.

На СОИ должны быть обозначены 453 задвижки, 102 регулирующих органа, 79 приводных двигателей, 488 параметров

и т. д. В системе сигнализации используется около 4,5 тыс. ламп. Применение избирательной системы контроля позволило свести к минимуму количество показывающих приборов — их установлено всего 28 штук. На мнемосхеме проставлены лишь соответствующие номера параметров.

Основу многокомпонентного СОИ блока составляет неоперативная мнемосхема, размещенная на специальных панелях, удаленных от пульта оператора на расстояние 2 м.

Принятию окончательного решения предшествовали детальная проработка и макетирование других вариантов мнемосхем. В частности, была разработана микромнемосхема, расположенная непосредственно на пульте, с целью совмещения сенсорного и моторного полей. Однако при таком объеме и сложности управляемого оборудования микромнемосхема оказывается слишком большой (около 3,5 м) и оператор не имеет возможности стратегически в целом оценивать обстановку; кроме того, мнемосхема не помещается в зоне максимальной досягаемости, размеры которой составляют около 1,8 м. Окончательное решение выбиралось на основе многократных проверок на натурных макетах и лабораторных моделях.

В процессе художественного конструирования мнемосхемы блока были применены сформулированные выше общие принципы компоновки СОИ. Дополнительные принципы, специфические для мнемосхем теплоэнергетического оборудования, проиллюстрируем на примере построения мнемосхемы котлоагрегата ТГМ-96. Метод основан на следующих положениях. Котел представляет собой в большой степени автономный объект управления, что определяет необходимость четкого пространственного отделения мнемосхемы котлоагрегата от схем других агрегатов блока промежутками, магистральными линиями, индивидуальными и вызывными контрольно-измерительными приборами и т. п.

Для обеспечения лучшего восприятия деталей или частей изображения по отдельности полезно увеличить расстояние между ними и четко обозначить границы, даже если для этого приходится уменьшать абсолютные размеры этих деталей. Изображения и предметы, отличные по характеру от основных, расположенные на границе мнемосхемы, улучшают ее выделение. Мнемоническое изображение котлоагрегата должно носить характер цельной, завершенной структуры.

Целесообразно выбрать единый мнемонический принцип изображения технологического процесса котлоагрегата в виде восходящего потока, так чтобы более высокое положение технологической линии ассоциировалось с более высокими параметрами рабочего тела — воды или пара, начиная с питательной воды внизу и кончая острым (перегретым) паром в верхней части мнемосхемы. Этот поток начинается узлом питания. Следует особо подчеркнуть технологическую важность этого узла, вследствие чего он должен быть выполнен весьма четко. Нижняя часть мнемосхемы котлоагрегата, занятая изображением газовоздушного тракта и одинаковыми повторяющимися фигурами — мнемосимволами горелок, получается весьма компактной и служит композиционной основой мнемосхемы котлоагрегата и всего блока в целом (мнемосхема котла расположена в нижней части щита блока ТЭЦ-21).

Поверхности нагрева в натуре имеют намного бо́льшие размеры, чем такие части котла, как узлы питания или регулирования перегрева, однако эти узлы с точки зрения представления информации и существа объекта управления важнее, поэтому логично делать отступления от реальной конструкции котлоагрегата, намеренно выделяя узлы контроля и управления и максимально сокращая размеры изображения поверхностей нагрева.

Крупный мнемосимвол барабана отделяет нижнюю («водяную») часть мнемосхемы котла от верхней («паровой»). Таким образом, элементы пусковой схемы и схемы нормального режима на мнемосхеме пространственно разделены.

Поскольку при разработке мнемосхемы сознательно не учитывались некоторые несущественные особенности конструкции котла ТГМ-96, изложенный метод условного мнемонического изображения котлоагрегатов не зависит от частных конструктивных особенностей котла ТГМ-96, поэтому он в дальнейшем нашел широкое применение при создании мнемосхем энергетических котлоагрегатов. Вообще создание базовых конструкций важно для накопления опыта проектирования мнемосхем и их неуклонного совершенствования. Однотипное построение мнемосхем обеспечит возможность взаимозаменять кадры операторов как внутри станций, так и в энергосистемах, распространять передовой опыт, проводить семинары и занятия с персоналом других электростанций на щите управления образцово-показательной станции.

При компоновке мнемосхемы турбогенератора наиболее широко применялся принцип автономности. Агрегат был предварительно разбит на ряд наиболее важных и относительно самостоятельных узлов, изображения которых размещены более или менее обособленно.

Первоначально мы предполагали разработать сменное СОИ, на котором изображение управляемого агрегата изменялось бы в зависимости от режима работы: пусковая схема, схема нормального режима, аварийная схема и т. д.; однако проведенные психологические эксперименты показали, что при столь сложных схемах агрегатов сменность, так же как и избирательное поочередное подключение идентичных агрегатов к одной мнемосхеме, порождает явление интерференции процессов решения. Необходимо разработать специальные методы выделения различий в состоянии технологических схем отдельных агрегатов. Вообще же статичность мнемосхемы блока ТЭЦ-21 должна быть отнесена к ее серьезным недостаткам. Более эффективное использование УВМ связано с динамическим отображением информации и особенно советов человеку-оператору.

При компоновке мнемосхемы мы приняли допущение, что не слишком длинные неразветвленные технологические линии эквипотенциальны, т. е. параметры рабочего тела неизменны по их длине, вследствие чего обозначения параметров можно свободно перемещать по линии, если это необходимо для придания схеме более завершенного композиционного характера.

Для четкого различения обозначений агрегатов и технологических линий нюансные (для агрегатов) цветовые соотношения с фоном противопоставлены контрастным (для линий), округлые и наклонные элементы символов агрегатов — четким вертикальным и горизонтальным линиям трубопроводов.

При компоновке мнемосхемы не соблюдалось соответствие между натуральными размерами агрегатов и величиной их условных обозначений: узлы, играющие небольшую роль в управлении и контроле объекта, выделены независимо от их небольших истинных размеров. Для усиления сигнальной функции мнемосхемы важно было добиться композиционной уравновешенности изображения объекта и его основных агрегатов в нормальном состоянии и явного нарушения равно-

весия изображения при отклонении режима работы от нормального.

Расположение мнемосхем отдельных агрегатов управляемого объекта на панели пространственно соотнесено с расположением органов управления этими агрегатами на пульте.

Для улучшения обзора мнемосхемы оператором она разбита на пять панелей, которые в плане образуют ломаную линию, описывающую дугу окружности, в центре которой находится оператор. Кроме того, панели мнемосхемы наклонены к оператору под углом 7° (по отношению к вертикали). Наклон верхнего козырька, на котором расположены световые сигнальные табло, малогабаритные электроизмерительные приборы и часы, составляет 14°.

Пульт управления имеет в плане форму дуги окружности, подобной той, которую описывает мнемосхема. Подобие форм пульта и мнемосхемы способствует правильному соотнесению сенсорной и моторной зон и обеспечивает композиционную цельность ансамбля.

Длительный сравнительный психологический анализ деятельности операторов блока ТЭЦ-21, при построении мнемосхемы которого использованы сформулированные принципы компоновки, и операторов других электростанций в условиях нормальной эксплуатации, специальных исследовательских аварий (см. п. 17), а также данные описанных выше лабораторных экспериментов позволили выявить качественное влияние этих принципов компоновки СОИ на реальные значения факторов сложности решения оперативных задач, которое отражено в табл. 31. Снижение реальных значений психологических факторов сложности решения оперативных задач при использовании в процессе синтеза структуры СОИ различных принципов обозначено в таблице стрелками.

Основные инженерно-психологические проблемы при создании СОИ связаны с выбором его состава и структуры. Вместе с тем повышение централизации управления в АСУ ТП приводит к увеличению разнообразия единичных явлений и параметров, отображаемых на одном СОИ, а следовательно, к расширению необходимого набора знаков, используемых при синтезе СОИ. Длина алфавитов знаков, используемых в мнемосхемах крупных АСУ ТП и включающих буквенно-цифровой и специальный символический коды, достигает 60—80. Число различных символов, выводимых на графические и алфавитно-цифровые электроннолучевые трубки (дисплеи), в некоторых случаях превысило 250. Вследствие этого повышаются требования к способам кодирования элементов информации на СОИ.

Вопрос выбора характеристик отдельных элементов СОИ — условных знаков и символов, отсчетных частей контрольно-измерительных приборов, шрифтов для надписей, конфигураций цифр и т. д. — разработан в инженерно-психологической

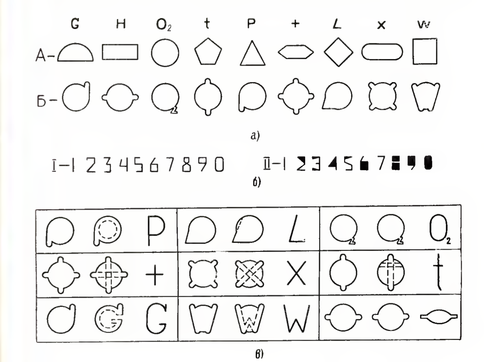
Таблица 31

Влияние разработанных принципов построения СОИ на психологические факторы сложности решения оперативных задач

Принципы построения СОИ	Психологические факторы сложности оперативных задач													
	Число связей между элементами объекта, относящимися к оперативной задаче	Число ступеней связей	Число прямых связей	Число косвенных связей	Коэффициент избыточности информации	Число операций в алгоритме решения	Число операций в алгоритме реализации решения	Оперативный объем отображаемой информации	Число критических элементов ситуации	Число элементов, выстраиваемых в очередь для обслуживания	Число оперативных единиц восприятия	Число конкурирующих вариантов решения	Коэффициент маскировки связей на СОИ	Коэффициент интерференции решений
	K_{1P}	K_{2P}	$K^{п}_{3P}$	$K^{к}_{3P}$	K_{4P}	K_{5P}	K_{6P}	K_{7P}	K'_{7P}	K_{8P}	K_{10P}	K_{13P}	K_{14P}	K_{15P}
Лаконичность	↓	↓	↓	↓	↓	—	—	↓	—	↓	↓	↓	↓	↓
Обобщенне и уннфикацня	↓	—	↓	—	—	—	—	↓	—	↓	—	—	—	—
Акцент на элементах контроля н управлення	↓	—		—	—	—	—	↓	—	↓	—	↓	↓	—
Автономность	↓	↓	↓	↓	↓		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Структурность	↓	↓	↓	↓	↓		—	↓	↓	↓	↓	—	↓	↓
Пространственное соотнесенне элементов контроля и управления	↓	↓	—	↓	—		—	↓	—	—	↓	—	↓	↓
Использование прнвычных ассоциацнй н стереотипов	↓	—	—	—	—	—	—	↓	↓	—	↓	—	—	—

Продолжение табл. 31

Принципы построения СОИ	Психологические факторы сложности оперативных задач													
	Число связей между элементами объекта, относящимися к оперативной задаче	Число ступеней связей	Число прямых связей	Число косвенных связей	Коэффициент избыточности информации	Число операций в алгоритме решения	Число операций в алгоритме реализации решения	Оперативный объем отображаемой информации	Число критических элементов ситуации	Число элементов, выстраиваемых в очередь для обслуживания	Число оперативных единиц восприятия	Число конкурирующих вариантов решения	Коэффициент маскировки связей на СОИ	Коэффициент интерференции решений
	K_{1P}	K_{2P}	$K_{3P}^{П}$	$K_{3P}^{К}$	K_{4P}	K_{5P}	K_{6P}	K_{7P}	K_{7P}'	K_{8P}	K_{10P}	K_{13P}	K_{14P}	K_{15P}
Стадийность	↓	↓	—	—	↓		—	↓	↓	—	—	↓	↓	↓
Оптимизация объема отображаемой информации	↓	↓	—	↓	↓		↓	↓	—	—	↓	—	↓	↓
Комбинирование интегральных и детальных СОИ	—	—	↓	↓	↓		↓	↓	—	↓	↓	—	↓	—
Наглядное отображение алгоритмов решения	—	—	—	—	—		↓	↓	—	—	↓	↓	↓	↓
Применение избирательных систем контроля и управления	↓	—	↓	↓	↓		↓	↓	↓	—	—	—	—	—
Разделение информации во времени (сменные СОИ)	↓	↓	↓	↓	↓		↓	—	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Разделение информации в пространстве	↓	—	—	↓	—		—	↓	—	↓	↓	—	—	—



47 *Варианты мнемосимволов параметров энергоблока и способов их оцифровки:*

а — буквенные обозначения параметров и варианты *А* и *Б* их мнемосимволов; *б* — варианты *I* и *II* начертания цифр; *в* — пояснения связей начертаний мнемосимволов с буквенными обозначениями параметров

литературе весьма подробно. Мы остановимся на одном аспекте этого вопроса — соотношении влияния величины различительных признаков и наличия ассоциаций между знаками и обозначаемыми явлениями на эффективность опознания отдельных информационных элементов.

Рассмотрим также вопрос о комбинировании принципа ассоциаций и различительных признаков при создании специальных знаков — мнемосимволов.

Начнем с экспериментального исследования относительного влияния на опознание знаков величины различительных и ассоциативных признаков. В качестве примера рассмотрим задачу выбора начертания мнемосимволов тепломеханических параметров энергетического блока, решавшуюся нами в связи с проектированием мнемосхемы блока ТЭЦ-21 Мосэнерго.

Необходимо было составить алфавит мнемосимволов следующих параметров: расход, уровень жидкости, содержание кислорода, температура, давление, добавка химреактива, ли-

нейное расширение или перемещение, химический состав и мощность.

В соответствии с известными инженерно-психологическими рекомендациями был взят набор из девяти символов, имеющих наиболее сильно выраженные различительные признаки [59]. Этот ряд приведен на рис. 47, *а* и обозначен как вариант *А* мнемосимволов. Над каждым знаком дано его общепринятое буквенное обозначение (добавка химреактива обозначена условно знаком «плюс»). Параметры расположены в порядке их перечня, приведенного выше.

В качестве альтернативы варианту *А* был разработан вариант *Б* алфавита мнемосимволов (рис. 47, *а*) со значительно меньшими различительными признаками: основа конфигурации всех символов варианта *Б* одинаковая — круг с добавлением различных по форме и расположению дополнительных мелких отличительных деталей.

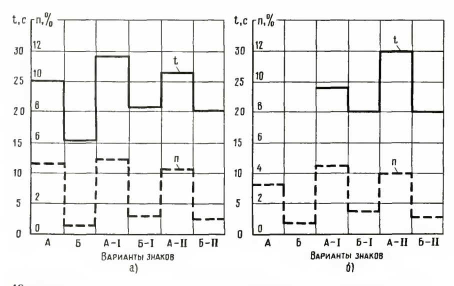
Вариант *Б* мнемосимволов построен на принципе ассоциаций между конфигурацией контуров знаков и начертанием букв, принятых для обозначения соответствующих параметров. На рис. 47, *в* между каждым мнемосимволом и буквой, обозначающими параметр, помещен знак, показывающий, как эта буква преобразована в мнемосимвол и должна «читаться» в этом символе.

Учитывая, что в современных АСУ ТП часто применяются избирательные системы контроля, необходимо добиваться не только четкого опознания «чистых» мнемосимволов, но и мнемосимволов с оцифровкой (как правило, двух-трехзначным числом). В этом случае важно также изучать эффективность восприятия цифр выбранного начертания и особенно оцифрованного мнемосимвола в целом.

На рис. 47, *б* приведены варианты *I* и *II* начертания цифр. Вариант *I* был предложен нами для мнемосхем энергетических объектов еще в 1962 г. Вариант *II* составлен на основе работ Б. Ф. Ломова и П. А. Кудина [71] по применению средств технической эстетики для повышения эффективности восприятия информации человеком-оператором.

Итак, экспериментальному сравнению были подвергнуты варианты мнемосимволов *А* и *Б* без оцифровки и с вариантами *I* и *II* оцифровки. Соответствующие испытывавшиеся комбинации обозначены как *А*, *Б*, *А—I*, *Б—I*, *А—II* и *Б—II* (рис. 51).

Символы предъявлялись испытуемым по одиночке и группами — целым алфавитом в случайном порядке. В опытах участвовало 10 человек с нормальным зрением. Символы проецировались на экран. Угловой размер символа 20′. В опытах фиксировалось число ошибок n, допущенных при опознании символов параметров, и затраченное на опознание время t (кроме одиночного предъявления одиночных символов), при котором время экспозиции задавалось автоматически и было равно 0,4 с.



48 *Результаты экспериментального сравнения вариантов мнемосимволов неоцифрованных (А и Б) с вариантами I и II оцифровки*:

а — при групповом предъявлении символов; *б* — при одиночном предъявлении

Результаты опытов, усредненные по всем испытуемым, приведены на рис. 48. Они показывают, что использование принципа ассоциаций существенно повышает эффективность опознания мнемосимволов, даже если при этом несколько уменьшаются различительные признаки символов.

Вместе с тем опыты показали, что, применяя символы, подобные варианту *Б* (см. рис. 48), очень важно обучить операторов их опознанию, добиться установления ассоциаций между каждым мнемознаком и обозначаемым предметом, процессом или явлением. Наблюдения показали, что подготовленные операторы легко и безошибочно опознавали символы параметров. Те же из них, которым символика не была разъяснена, воспринимали символы как условные знаки, различающиеся лишь «положением хвостика», и делали много ошибок при их опознании.

В качестве другого примера применения принципа ассоциаций для повышения эффективности опознания символов можно привести символы органов управления, предложенные нами взамен обычных ламп, сигнализирующих на мнемосхеме зеленым или красным свечением положение органа. Принцип изображения символа задвижки — органа управления, имеющего два возможных положения: «Открыто» и «Закрыто», заключается в том, что положение «Закрыто» сигнализируется светящейся красной линией на символе, ориентированной поперек техноло-

49 *Варианты мнемознаков органов управления*

гического потока, запираемого данной задвижкой, а положение «Открыто» — зеленой линией вдоль технологического потока, т. е. применено не только традиционное кодирование цветом, но и формой, обладающей ассоциативными признаками, что существенно повысило скорость и точность опознания положения органов управления на мнемосхеме крупного энергоблока. Вместе с тем возникли трудности в выборе наилучшего варианта мнемосимвола.

На рис. 49 представлены некоторые варианты символа задвижки, основанного на этом принципе. В эксперименте необходимо было выявить влияние относительного расположения числа и формы сигнальных линий на читаемость трехзначной цифры, обозначающей избирательный номер органа управления, и восприятие сигнала положения.

Эксперименты проводились двумя способами: методом кратковременного тахистоскопического предъявления мнемознаков (время экспозиции 0,4 с), а при свободной экспозиции испытуемый сам отключал подсветку мнемознака сразу по его прочтении.

В экспериментах участвовало 14 испытуемых с нормальными остротой зрения и цветоразличением. При тахистоскопическом предъявлении фиксировались ошибки в чтении номера (в том числе ошибки, приходящиеся на первую — третью цифры) и сигнала положения; при свободном предъявлении фиксировалось также время чтения знака.

Усредненные результаты приведены в табл. 32.

Таблица 32

Результаты сравнения вариантов мнемознака задвижки

Показатель	Вариант мнемознака				
	1	*2*	*3*	*4*	*5*
Среднее время чтения, с	1,02	1,68	1,58	1,34	1,22
Среднее квадратическое отклонение	0,22	0,15	0,20	0,14	0,20
Процент ошибок в чтении сигнала положения	5,3	15	8,3	10	7,5
Процент ошибок в чтении трехзначного номера	11,6	23,3	20	16,6	13,3
В том числе процент ошибок, приходящихся на первую цифру	7,5	8,3	3,3	1,6	7,6
То же на вторую цифру	2,5	5,8	6,6	5,0	3,3
То же на третью цифру	1,6	9,2	10,1	10	2,4

За исключением разности по времени чтения между вариантами *2* и *3*, а также *4* и *5* все остальные выборочные разности достоверны с доверительной вероятностью 0,95. По числу ошибок статистические оценки не производились.

Проведенные эксперименты показали, что из сравнивавшихся вариантов мнемознаков наилучшие показатели имеет первый вариант. Для обеспечения наиболее точного чтения номера знака светящуюся линию, обозначающую положение задвижки, следует располагать в нижней части сигнального элемента и сбоку от номера, со стороны наименее важной из тех цифр, которые составляют номер. Например, на мнемосхеме ТЭЦ-21 первая цифра у номеров всех элементов каждого агрегата одинакова; ее легко уточнить по положению сигнального элемента на панели или по соседним номерам. Последняя же цифра должна читаться безошибочно, поэтому был применен первый вариант мнемознака. Сплошная яркая светящаяся линия сигнала положения (вариант *5*) иррадиирует и затрудняет чтение цифр. Линию следует делать штриховой. Светящаяся линия затеняет ближайшие к ней части цифр. Например, горизонтальная линия затрудняет восприятие нижней половины цифр, если она расположена под номером элемента, и верхней, если находится над ним.

При разработке мнемознаков особо исследовалась также зависимость читаемости их номеров от типа контраста — прямого и обратного. Вариант мнемосимвола *1* (см. рис. 49) выполнялся с темными номерами на светлом фоне и светлыми номерами на темном фоне с подсветкой и без подсветки сигнальных элементов. Количественные показатели читаемости разных вариантов мнемознаков оказались очень близкими и по точности, и по скорости.

Все это подтверждает известный факт, что на опознание символов влияет множество факторов. Одним из зачастую игнорируемых факторов является место символа в зрительном поле человека-оператора. Для изучения влияния этого фактора на опознание описанного мнемосимвола органа управления было предпринято экспериментальное исследование [121].

Исследование проводилось в условиях ограниченной, тахистоскопической экспозиции предъявления мнемознаков. Испытуемые считывали лишь номера символов, положение органа управления не сигнализировалось. Таблица включала шесть прямоугольных символов, имеющих трехзначные числа и расположенных двумя столбцами по три символа (места символов в левом столбце 1, 2, 3, в правом столбце 4, 5, 6). Взор испытуемого фиксировался в центре информационного табло. Доэкспозиционное поле было темным.

Основные характеристики информационного объекта и условий его предъявления были следующими: расстояние между испытуемым и рассматриваемой поверхностью 1,0 м; угол обзора табло по горизонтали 5° вправо и 5° влево от точки фиксации; угол обзора по вертикали 3° 30′ вверх и 3° 30′ вниз по линии взора; угловые размеры рассматриваемых мнемознаков 40′ по высоте и 70′ по ширине; интервалы между предъявлениями 15 с. В работе был применен метод комплексной регистрации электроэнцефалограммы, электроокулограммы и речевых ответов на предъявляемый объект.

Испытуемый находился в светозвуконепроницаемой камере. Для регистрации электрофизиологических показателей использовался восьмиканальный электроэнцефалограф, снабженный анализатором и интегратором. Экспериментальный материал получен на 20 испытуемых; всего было проведено 50 опытов — три серии.

В первой серии целью экспериментов было определение эффективности (точности) опознания трехзначных номеров знаков в зависимости от длительности предъявления и местоположения числа в таблице. Длительность предъявления составляла 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 с.

Результаты первой серии экспериментов показали, что минимальное время, необходимое для опознания трехзначного номера знака, равно 0,3 с. Оптимальную зону предъявления чисел при данной экспозиции составляют средние места таблицы — второе и пятое.

Вторая серия экспериментов была направлена на определение уровня зрительного комфорта при восприятии цифровой информации с помощью методик электроокулографии и электроэнцефалографии. При этом основное внимание было уделено изучению глазодвигательных реакций в зависимости от места предъявления знака на таблице.

Сравнительный анализ результатов по ЭЭГ и ЭОГ показал, что более эффективной в наших условиях оказалась методика ЭОГ, позволяющая изучать ряд факторов, характеризующих визуальную деятельность человека. К их числу можно отнести латентный период глазодвигательной реакции, величина которого изменялась в пределах 0,1—0,2 с.

В третьей серии экспериментов ставилась задача более детального исследования механизма установочных движений глаз в зависимости от местоположения знака в поле зрения (относительно исходной фиксационной точки). Период установочного движения глаз в основном зависит от места предъявления объектов в поле зрения. Минимальной оказалась длительность установки глаз на пятое место, а максимальной — на третье. Количественный анализ результатов по ЭОГ позволил установить предпочтительный ряд мест знаков на таблице в порядке увеличения времени установки: 5, 2, 4, 1, 6, 3.

Оптимальное расположение чисел соответствует уровню заданной точки фиксации. Отклонения от этого уровня приводят к увеличению длительности установочного движения и времени опознания. Например, при отклонении взора на 18° вниз от точки фиксации длительность установочного движения возрастает на 25%.

Следовательно, для выравнивания эффективности опознания мнемознаков в разных участках информационного поля экспозиция их предъявления должна устанавливаться с учетом времени, затраченного на установку взора на соответствующий участок.

Эффективность опознания информации в точках, не соответствующих уровню фиксации взора, может быть достигнута при условии более длительной экспозиции.

Очень сложен вопрос об оптимальном соотношении различительных и ассоциативных признаков и художественно-композиционных приемов при проектировании алфавитов знаков и мнемосимволов.

Рассмотрим этот вопрос на примере начертания цифр. На рис. 50 представлены варианты конфигурации цифр.

Вариант *а* был предложен американским исследователем Лансделлом для авиационного приборостроения. Проведенная им экспериментальная проверка показала, что такая конфигурация цифр обеспечивает более точное их чтение при малом вре-

а)

б)

в)

50 *Цифры для особо затрудненных условий восприятия*:
а — цифры Лансделла; *б* и *в* — модификации их начертания

мени экспозиции, а также при наклоне их на $\pm 45\%$ по отношению к наблюдателю, чем стандартное написание, а также широко известные варианты Бергера, Макворта, Слейта [76].

На рис. 50, *б* показана модификация цифр Лансделла, предложенная Б. Ф. Ломовым и П. А. Кудиным [71]. Авторы справедливо отмечают, что этот вариант отличается от первоначального стилевым единством написания всех цифр. Многие художники-графики и искусствоведы, которым были показаны варианты цифр, положительно отзывались об эстетических преимуществах варианта, приведенного на рис. 50, *а*, по сравнению с вариантом, показанным на рис. 50, *б*.

Однако в отношении сравнительной читаемости обоих вариантов цифр сомнение вызывало следующее обстоятельство.

Как известно, опознание знаков, составляющих данный алфавит, зависит от длины алфавита и различительных признаков. Общий алфавит в обоих вариантах одинаков — 10 цифр. При этом ряд, который составляют цифры Лансделла, довольно четко распадается на две группы: цифры 1, 3, 5 и 7 имеют малую затушеванную площадь, а 2, 4, 6, 8, 9, 0 — бóльшую. Таким образом, различение отдельных цифр производится наблюдателем внутри двух подалфавитов, состоящих из четырех и шести знаков.

Вариант *б* выполнен в едином стиле: все цифры включают общий унифицированный отдельный элемент, они составляют цельный ряд из девяти знаков (исключается единица). На этом основании мы предположили, что вариант *б*, возможно, читается хуже, чем вариант *а*. По совету Б. Ф. Ломова нами был поставлен эксперимент. Цифры проецировались с помощью

тахистоскопа на экран, установленный в 1,2 м перед испытуемым. Угловой размер цифры (по высоте) составлял 40′. Цифры предъявлялись в виде различных комбинаций трехзначных чисел темными на светлом фоне в вертикальном положении и с наклоном 45° вправо и влево. Время экспозиции составляло 0,2 с. В экспериментах участвовало 10 испытуемых, пять из которых начинали опыты с варианта *а* и переходили на вариант *б*, остальные пять — в обратном порядке.

Испытуемому предъявлялось по 40 трехзначных чисел каждого варианта.

Всего испытуемыми было допущено при чтении варианта *а* 128 ошибок (32%), варианта *б* — 114 ошибок (28,5%).

Таким образом, наше предположение о худшей читаемости модификации цифр Лансделла (вариант *б*) не подтвердилось.

Однако анализ ошибок по отдельным цифрам показал, что если в варианте *б* ошибки распределены приблизительно равномерно по всем цифрам, то в варианте *а* 87 ошибок (21,7 от 32%) приходятся на цифры 2 и 4, написание которых в варианте Лансделла больше всего отличается от привычного стандартного.

Таким образом, здесь нарушен принцип использования привычных ассоциаций. В дополнительную серию экспериментов мы ввели вариант *в*, составленный на основе варианта *а*, но цифры 2 и 4 были взяты из варианта *б*. Этот третий вариант дал наилучшие результаты по точности чтения — число ошибок составило 14%. Это подтвердилось и в других условиях восприятия, которые были в описанных ранее экспериментах (см. рис. 48).

Применение художественных средств для достижения стилевого единства алфавита знаков (вариант *б*) в данном случае оказалось неэффективным.

С другой стороны, известна масса примеров, многие из которых рассмотрены в работах Б. Ф. Ломова, когда применение художественно-композиционных приемов позволяет существенно улучшать условия, облегчать и четко организовывать зрительное восприятие информации. Важно при этом учитывать также величину различительных признаков и привычные ассоциации, выработавшиеся у людей, для которых предназначены создаваемые алфавиты знаков. Конечный результат должен оцениваться экспериментально по показателям эффективности восприятия знаков и особенно решения оперативных задач.

27

Художественное конструирование оперативно-диспетчерских средств городской транспортной АСУ

Среди многочисленных перспективных оперативных задач видное место занимает централизованное управление движением городского транспорта. Быстрый рост интенсивности движения транспорта в крупных городах требует создания систем оптимизации этого движения — повышения пропускной способности магистралей и безопасности движения. Пока задача создания централизованной автоматизированной системы дви- ния транспорта решается для г. Москвы (эта АСУ получила пазвание системы «Старт»). В недалеком будущем подобные адачи будут типичными и для других городов страны. Многие зникающие при этом инженерно-психологические и худо- ственно-конструкторские вопросы типичны для создания пунктов централизованного управления разнообразными транспортными АСУ, поэтому опыт нашей лаборатории по про- тированию комплекса информационных средств, пультов управления и интерьера пункта управления системы «Старт» может быть полезен для многих проектировщиков и художников-конструкторов.

Основные функции операторов и диспетчеров в системе «Старт»

«Старт» — система телеавтоматизированного централизованного управления движением транспорта в г. Москве. Первая очередь системы «Старт» предусматривает автоматизированное управление движением транспорта в пределах Садового кольца, осуществляемое сменой из четырех операторов. При расширении системы будет создано еще 6 пультов управления по секторам г. Москвы вне Садового кольца (по 2 оператора на каждый сектор). Операторы, управляющие отдельными районами города, подчиняются четырем диспетчерам по городу, к которым стекается вся оперативная информация о работе системы в целом.

Диспетчерское и оперативное управление предназначается в системе «Старт» прежде всего для экстренных ситуаций, для которых пока не имеется алгоритмов автоматического управления.

В распоряжении оператора имеются следующие средства отображения информации: мнемосхема дорожнотранспортной сети района, система телевизионного обзора улиц и перекрестков — видеоконтрольные устройства (ВКУ), знакогенерирующая электроннолучевая трубка (дисплей), устройства диспетчерской связи.

Для управления этими техническими средствами на рабочем месте каждого оператора имеются коммутатор на 40 номеров, пульт, включающий панель настройки телевизионных каналов и панель связи с управляющим вычислительным комплексом (УВК), и клавиатура дисплея. Посредством панели связи с ВК оператор может взять перекресток на ручное управление и осуществлять переключение светофорных тактов по своему усмотрению,

сменить программу управления перекрестками данного района, перевести перекресток на местное управление, управлять указателями, управляемыми знаками и другими визуальными дорожными сигналами.

При возникновении затруднения в устранении ненормального состояния системы районный оператор обращается к диспетчеру по городу.

Диспетчеры осуществляют наблюдение за состоянием движения транспорта в пределах г. Москвы, координируют работу операторов Садового кольца и местных пунктов управления. Они получают информацию с помощью мнемосхемы дорожно-транспортной сети города, телефонных коммутаторов и системы телевизионного обзора (ВКУ).

Организация работы операторов выполнена таким образом, что каждый из четырех имеет возможность управления любым перекрестком или контролируемым пунктом в пределах района (на первой очереди системы — в пределах Садового кольца), любым из 24 телевизионных каналов, а также может через коммутатор связаться с любым местным постом. В свою очередь, каждый из диспетчеров может включить видеомагнитофон, просмотреть изображение любого телевизионного канала и связаться через коммутатор с любым оператором или местным постом. Таким образом, реализуется коллективный метод работы операторов и диспетчеров.

Информация, представляемая операторам и диспетчерам

Общая информация о работе системы телеавтоматического управления движением транспорта поступает к оператору постоянно. Основным источником такой информации является мнемосхема, представляющая собой план-схему дорожно-транспортной сети района, на которой указываются вызывные адреса (номера) перекрестков и световая сигнализация основных событий.

Для важных перекрестков, связанных по управлению с управляющим вычислительным комплексом, сигнализируется: затор движения, неисправность автоматического оборудования, переход на местное управление.

Для менее важных объектов, таких как перекрестки, не связанные по управлению с УВК, пункты управления реверсивной полосой, пункты контроля негабаритного груза, пункты управления указателями и знаками, сигнализируется только неисправность оборудования.

Ориентировочная средняя частота появления сигнала на мнемосхеме приведена в табл. 33.

Таблица 33

Ориентировочная частота появления сигналов

Вид информации	Допускаемая задержка исполнения, мин	Частота появления
Неисправность	1	2 раза в сутки
Местное управление	1	80 раз в сутки
Затор	10	1 раз в 5 мин (2 часа вечером и утром)

Частота вывода и обновления информации — 1 раз в 5 с. Запоминание информации осуществляется релейным блоком. Индикаторы на мнемосхеме выполняются на лампах накаливания.

При полном развитии системы «Старт» будет создана мнемосхема дорожно-транспортной сети г. Москвы; число районных мнемосхем при этом предполагается равным 7, причем одна из них — мнемосхема Садового кольца — для первой очереди внедрения системы. Она должна отображать состояние 82 объектов, на каждом из которых имеется три двухпозиционных сигнала и 100 объектов с одним двухпозиционным сигналом.

При возникновении непредвиденной ситуации (затора, сбоя в работе автоматики) на мнемосхеме загорается соответствующий мигающий световой сигнал, причем имеется возможность его квитирования оператором с пульта.

Непосредственное управление сигнальными элементами мнемосхемы с выходов устройств кодового управления (УКУ), входящих в состав УВК, нецелесообразно из-за необходимости использования нескольких УКУ, большого числа соединительных проводов между УКУ и мнемосхемой и сложности реализации режима мигания сигналов. Поэтому применен промежуточный релейный блок, управляемый от УКУ и воздействующий на сигнальные элементы.

При включении объектного реле происходит подключение соответствующего сигнального элемента к пульсирующему напряжению. Отключение от пульсирующего напряжения и переход сигнального элемента в режим постоянного свечения осуществляется после нажатия клавиша квитирования на пульте оператора. Центральная мнемосхема, представляющая собой план-схему дорожно-транспортной сети всего города Москвы, должна отображать состояние 1200 объектов, на 300 из которых имеется по три двухпозиционных индикатора, на остальных — по одному двухпозиционному индикатору.

Учитывая, что после внедрения первой очереди системы «Старт» на пункт управления будет поступать информация о движении только в пределах Садового кольца, предусматривается использование диспетчерами по городу мнемосхемы Садового кольца, дополненной компактным (в уменьшенном масштабе) изображением основных дорожноуличных магистралей вне Садового кольца без сигнализации состояния перекрестков на них.

Информация, подлежащая выводу на мнемосхему, формируется подпрограммами управления перекрестками старших рангов, управления объектами и подпрограммой определения заторов и образует массив из четырех подмассивов, каждый размером 20 байтов. В первом подмассиве находится информация о неисправностях аппаратуры на перекрестках старших рангов, во втором — об объектах, находящихся на местном управлении, в третьем — о наличии заторов, в четвертом —

о неисправностях объектов. Первые три подмассива выводятся на мнемосхему с частотой 1 раз в 1 мин, а четвертый — 1 раз в 5 мин.

В соответствии с требуемой частотой вывода подмассивов на мнемосхему подпрограмма вывода состоит из четырех модулей. При входе в подпрограмму управление передается тому модулю, чей адрес записан в специальную ячейку передачи управления.

При необходимости управления движением в отдельных узлах дорожной сети к оператору должна поступать более детальная информация — точная характеристика состояния потока в нужном пункте. Информацию такого типа оператор получает по вызову посредством дисплея, связанного с вычислительным комплексом, или по системе телевизионного обзора на ВКУ.

На первом этапе развития системы «Старт» (в пределах Садового кольца) в системе телевизионного обзора предусмотрены на диспетчерском пункте: полиэкран, состоящий из 24 телевизоров, ВКУ для операторов и 4 телевизора на рабочих местах диспетчеров.

Частоты видеоканалов выбраны близкими или равными частотам каналов телевизионного вещания, что позволило использовать в качестве приемных видео-контрольных устройств промышленные телевизоры.

К ВКУ, предназначенному для работы в многоканальной информационной системе, предъявляются следующие основные требования: отсутствие искажений принимаемого сигнала при наличии на его входе сигналов соседних каналов с амплитудой, равной амплитуде сигнала принимаемого канала; разрешающая способность по горизонтали должна обеспечивать различимость 450 телевизионных линий; возможность подключения видеомагнитофона для записи и просмотра записанной информации; наличие дистанционной регулировки контрастности и яркости изображения; размер экрана по диагонали не менее 47 см.

Прямые проводные линии должны связывать управляющий центр с телевизионным коммутатором, установленным на контролируемом пункте. Видеосигнал с телекамер каждой группы перекрестков поступает на соответствующий этой группе телевизор полиэкрана. Выбор и управление передающими телекамерами осуществляется оператором со специальной панели управления каналами, которая содержит 48 клавишей управления: 1 Выбор телекамеры (24 клавиша — выбор группы, 3 — сброс выбранной группы, 6 — выбор телекамеры, 1 — сброс выбранной телекамеры). 2. Управление телекамерами (4 клавиша — наведение телекамеры, 2 — фокусировка, 2 — масштабирование, 2 — включение и выключение дежурного режима). 3. Дистанционное управление *ВМУ* (2 клавиша — регулировка контрастности, 2 — регулировка яркости).

При нажатии клавишей наведения телекамера поворачивается в горизонтальной плоскости на угол $\pm 180^\circ$ и в вертикальной плоскости — на угол $\pm 45^\circ$. При нажатии клавиша «фокусировка» происходит изменение фокусного расстояния вариообъектива.

На панели осуществляется индикация номера выбранного телевизионного канала и сигнализация следующих его состояний: «Сеть» — подключение системы к внешней электрической сети; «Дежурный режим» — выбранный канал готов к работе; «Канал занят» — канал выбран другим оператором.

Для получения телеинформации с нужного перекрестка оператор должен набрать номер группы перекрестков клавишами «Выбор канала» и включить дежурный режим, затем нажать на клавиш «Выбор телекамер». При этом включаются в рабочий режим телекамера и соответствующее данному каналу ВКУ.

Нажав клавиш «Сброс» в ряду «Выбор телекамер», оператор переводит все телекамеры и ВКУ данной группы на дежурный режим. Выключить телекамеры и ВКУ данной группы можно, нажав клавиш «Выключение дежурного режима». Клавиши «Сброс» предназначены для сброса набранного кода канала.

Каждый диспетчер имеет на своем рабочем месте 1 телевизор-ВКУ для приема видеосигнала через специальную систему коммутации с любой телекамеры системы телевизионного обзора. На диспетчерском пульте управления ответственного дежурного расположена панель выбора канала, имеющая 22 клавиша цифрового набора. Номер выбранного канала фиксируется на индикаторе.

Для осуществления видеозаписи дежурный имеет панель управления видеомагнитофоном с клавишами «Запись» и «Стоп». Здесь же осуществляется сигнализация о готовности магнитофона к записи, о проведении записи и о занятости магнитофона другим ответственным дежурным.

Основным источником детальной информации о состоянии какого-либо узла дорожной сети является дисплей, служащий для вывода информации из вычислительной машины. Дисплей СИД-1000 (станция индикации данных) является универсальным оконечным устройством, использующим электроннолучевую трубку. Он предназначен для ручного набора информации оператором, редактирования набранного сообщения, передачи сообщения в центр обработки информации и получения ответа из центра обработки информации.

В комплект устройства входят индикатор, клавиатура, блок управления с буферным запоминающим устройством емкостью 1024 байта. В качестве индикатора используется телевизионная приемная трубка 35ЛК7Б.

Техническая характеристика дисплея СИД-1000

Количество знаков на экране	1024 (16 строк по 64 знака)
Размер знака:	
высота	4 мм
ширина	2,4 и 3,6 мм
Расстояние между строками	6 мм
Алфавит буквенно-цифровых знаков	96 знаков
Частота смены кадра на экране	50 Гц
Общее число клавишей	94

Виды информации, выводимой на дисплей в системе «Старт»: 1) графическая информация: план перекрестка с показанными на нем полосами движения, разрешенными направлениями движения, состоянием знаков и указателей в данный момент времени; 2) буквенно-цифровая информация в табличном виде:

номер и наименование перекрестка, алгоритм или программа работы, затор с указанием направления, отказ аппаратуры.

Величина интенсивности движения и идентификатор затора выводятся как средние за предыдущие 5 мин.

Дисплей работает однократно по вызову оператора. Для вызова информации на дисплей оператору необходимо на панели управления дисплеем, имеющей 94 клавиша, набрать код нужного перекрестка, нажать клавиш «Передача сообщения», а затем клавиш приема. При этом зажигается лампочка индикации «Ожидание сообщения из ЭВМ» и устройство переходит в режим индикации. Информация появляется на экране дисплея через 2,5—3 с.

Для осуществления управления движением транспорта каждый оператор имеет на своем пульте панель связи с вычислительным комплексом, включающую в себя клавиши набора кода объекта, клавиши набора кода команды (переключение тактов, включение желтого мигающего сигнала на перекрестке, перевод на местное управление, включение указателей) и функциональные клавиши (квитирование мнемосхемы, запрос, отбой, управление знаками, управление светофорами, обращение к подпрограммам).

При выдаче команды оператор должен набрать код объекта, нажать клавиш команды (управление знаками или управление светофорами), набрать код команды и нажать клавиш «Запрос» (разрешение исполнения) При этом должна загореться сигнальная лампочка, расположенная на панели связи с УВК, до момента считывания команды вычислительным комплексом.

Для обеспечения оперативио-диспетчерской связи, иеобходимой в процессе управлеиия движением траиспорта в г. Москве, предназиачеиы устройства диспетчерской связи, выполиенные в виде коммутаторов, операторов и диспетчеров.

Қонструктивио все коммутаторы состоят из иастольного пульта и стативного оборудования. Вызов абонента осуществляется иажатием соответствующей линейной киопки. Удержание линии осуществляется путем нажатия специальной общей кнопки. При этом линия отключается от разговорных приборов. Подключеиие к удерживаемой линии осуществляется повторным иажатием линейной кнопки этой линии. Соединение с абонентом АТС осуществляется путем иабора нужного номера.

В коммутаторах диспетчеров и операторов предусмотреио ручное (специальной кнопкой) автоматическое включение звукового магнитофона.

Психологические исследования и художественное конструирование оборудования и интерьера пункта управления

Высокая ответственность и разнообразие функций операторов и диспетчеров системы «Старт» и соответствующего этим функциям состава информации, а также новизна АСУ данного
 типа, создаваемой впервые в нашей стране, предъявляют осо-

бые требования к методам исследования и художественного конструирования информационных средств.

Особое внимание должно быть уделено вопросам отбора наиболее представительной информации и принципам ее отображения. Наиболее серьезное опасение в такого рода системах вызывает перегруженность СОИ разноплановой информацией, имеющей различную степень экстренности и важности, в сумме зачастую превышающей объем, который может быть эффективно переработан оператором. В этом случае структура СОИ должна позволять человеку быстро сориентироваться в состоянии работы транспортной системы, выбрать наиболее ответственные объекты и сосредоточиться на нормализации их режимов. Информация, не способствующая решению наиболее типичных задач, должна рассматриваться с точки зрения постоянного отображения на СОИ как излишняя, иррелевантная и переводиться на систему вызова. Решение о значении и частоте использования различной информации принимается на основе тщательного и всестороннего статистического анализа функционирования системы, специфики оперативных задач и психологических процессов их решения. По поводу построения мнемосхемы, алгоритмов работы вычислительного комплекса и устройств вывода информации из ЭВМ — дисплеев был сформулирован ряд рекомендаций по практическим методам согласования интенсивности потока сигналов, поступающих к оператору, с его реальной производительностью по переработке сигналов. Все эти методы направлены на повышение эффективности решения задач путем снижения доли иррелевантной информации и ее вредного влияния на деятельность оператора.

В алгоритмах работы УВК мы рекомендовали в определенных случаях предусматривать предварительное автоматическое разделение независимых сигналов (или их комплексов, относящихся к группам объектов) по важности на приоритетные группы. На СОИ должны подаваться в первую очередь сигналы высших приоритетных групп, требующие наиболее экстренного вмешательства оператора, в количествах, соответствующих наибольшему значению избранного критерия оптимальности оперативного управления. Сигналы, относящиеся к второстепенным оперативным задачам, должны временно задерживаться в буферной памяти информационной системы и подаваться по мере освобождения оператора или по их вызову. Поскольку районная транспортная система может быть разбита на несколько автономных частей (подрайонов), связанных с соответствующими типичными режимами их работы и оперативными задачами, то мгновенный объем отображаемой информации может быть снижен за счет избирательного контроля состояния объектов и подрайонов по телевизионному полиэкрану и по СОИ сменного типа, реализуемых на дисплее с предварительной подготовкой пакета информации в УВК. Дополнительный

эффект должен быть достигнут использованием принципов автономности и структурности при компоновке постоянной мнемосхемы системы. В этом случае отображения подрайонов могут разделяться уже не во времени, а в пространстве.

Основные магистрали дорожно-транспортной сети должны быть постоянно отображены на мнемосхеме, однако они имеют существенно различное значение для решения конкретных возникающих задач, поэтому следует предусмотреть в дальнейшем выделение (например, высвечивание) в соответствующие периоды релевантных с точки зрения данной задачи магистралей и объектов. Такой метод является частным случаем применения компоновочного принципа акцента на основных информационных элементах.

Одним из наиболее универсальных методов борьбы с иррелевантной информацией является реализация принципа оптимальной лаконичности — изъятие с мнемосхемы транспортной системы всякой информации, кроме действительно необходимой для успешного решения выделенного круга оперативных задач. Разработчики СОИ направили усилия совместно с проектировщиками АСУ «Старт» (головная организация Мосгортранспроект) на сокращение номенклатуры отображаемых объектов и магистралей за счет тех, которые не требуются постоянно оператору, с тем чтобы значительно усилить наиболее представительную информацию [1].

Важное значение имеет также уменьшение объема скрытой информации, т. е. знаний об объекте, которые оператору необходимо привлекать в дополнение к полученному от СОИ пакету информации, чтобы успешно справиться с возникшей задачей. Это достигается наглядным отображением на средствах вывода информации из УВК не только осведомительных сигналов, но и алгоритмов необходимых ответных действий оператора, подобно тому как это ранее было описано на примере командно-информационных СОИ. Частным случаем отображения алгоритмов является известный в инженерной психологии принцип расположения органов управления в соответствии с логикой действий оператора. Такое отображение информации на дисплее позволит оператору в некоторых стандартных случаях действовать быстро и уверенно, пользуясь советами ЭВМ и инструкциями. Это особенно важно при экстренной ликвидации крупных нарушений режимов, когда от оператора требуется предотвращение опасных последствий, обычно достигаемое путем точного следования инструкциям. Отображение таких инструкций в виде КИСО, несомненно, более эффективно, чем выполнение их оператором на память. В этом случае, как и в большинстве других, КИСО необходимо рассматривать как

[1] См. **Венда В. Ф.** и др. Художественное конструирование пункта управления движением транспорта. — «Техническая эстетика», 1973, № 8, с. 1—7.

абстрактное СОИ лишь условно, поскольку оператор может подробно истолковать физический смысл любого символа на дисплее и любого своего действия, однако в экстренных ситуациях такое толкование иногда лишь затягивает время решения задачи.

Возможно применение комбинации КИСО, представленного на дисплее, и обычно ассоциативного СОИ в виде мнемосхемы дорожно-транспортной сети. В этом случае, если обстановка позволяет, оператор может рассматривать отображенный на дисплее совет (инструкцию) по решению задачи лишь как резервный («на крайний случай») и попытаться найти более оптимальный вариант решения, привлекая все свои знания технологии объекта и опираясь, если необходимо, на СОИ ассоциативного типа. Очевидно, что применение абстрактных СОИ целесообразно только тогда, когда освобождение оператора от необходимости обращаться к содержательной стороне своей деятельности, интерпретировать технологический (истинный физический) смысл информации способствует более успешному выполнению им своих функций. Особое значение для данной принципиально новой АСУ может иметь деятельность оператора с такими СОИ, направленная специально на отработку экспериментальных алгоритмов автоматического управления движением транспорта.

Один из главных принципов при проектировании СОИ должен состоять в том, чтобы отразить на СОИ в наиболее ясной форме все наиболее существенное, что известно разработчикам об управлении данной системой. Все, что не является проблемой для разработчиков, не должно быть загадкой и для оператора, ибо у него будут менее подходящие условия для ее отгадывания.

Следует по этому поводу заметить, что проявляющееся у некоторых проектировщиков АСУ стремление сделать искусственно труд оператора более творческим там, где его можно свести к уровню простых сенсомоторных реакций, неправомерно, поскольку оно, усложняя процессы управления каждым отдельным районом или объектом, препятствует дальнейшей централизации управления, затрудняет накопление данных по формализованным алгоритмам и не позволяет высвобождать наиболее квалифицированных операторов для управления объектами и системами на более высоком уровне в иерархической системе, где на данное время еще есть действительные «загадки» с точки зрения оперативного управления.

Обоснованный выбор типа СОИ для подобной новой системы, его структуры и отдельных инженерно-психологических характеристик невозможен без применения экспериментальных исследований на действующих макетах и моделях информационных средств, что должно быть предусмотрено при организации проектирования.

Основным элементом многокомпонентных СОИ, примененных в системе, является мнемосхема дорожно-транспортной сети

города, наиболее соответствующая отображению топологически постоянной и очень сложной структуры сети, с большим числом контролируемых и управляемых объектов. На мнемосхеме может быть отображена только обобщенная, интегральная информация о состоянии дорожно-транспортной сети г. Москвы, поскольку, очевидно, ее детальное отображение психологически нецелесообразно, так как быстро сориентироваться в ней будет невозможно. Это показали опыты, в которых задачи прослеживания наиболее целесообразных, с учетом конкретного состояния сети и положения указателей, маршрутов решались испытуемыми по подробной карте улиц г. Москвы.

При проектировании мнемосхемы и всего комплекса информационных оперативно-диспетчерских средств системы «Старт» особенно остро встала проблема снижения реальной сложности оперативных задач путем комплексной рационализации состава и структуры этих средств.

Для этого нами были использованы следующие приемы. В соответствии с принципом лаконичности на мнемосхеме были отображены только основные магистрали, обеспечивающие пропуск около 90% транспортных единиц в часы «пик». Это позволило сократить число отображенных на мнемосхеме улиц примерно в 10 раз по сравнению с исходной картой дорожно-транспортной сети г. Москвы.

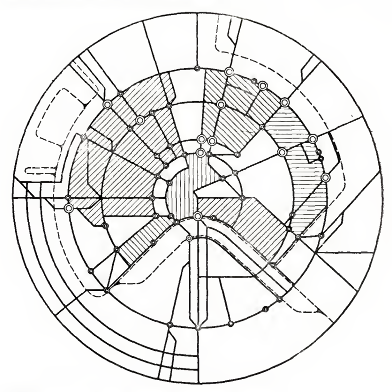
Структурность мнемосхемы достигалась путем применения комплекса художественно-композиционных приемов, описанных в п. 25. Изготовлен действующий макет первого варианта мнемосхемы дорожно-уличной сети г. Москвы с мнемоэлементами, отображающими номер и состояние перекрестка (затор движения транспорта — красный световой сигнал, отказ автоматики — желтый, перевод на местное управление — зеленый), расположенными рядом со знаком соответствующего перекрестка. Для оперативного управления сигналами на макете мнемосхемы в ходе инженерно-психологических исследований процессов решения задач по оценке состояния системы и управлению состоянием указателей сотрудниками нашей лаборатории была разработана специальная оперативная микромнемосхема. Наряду с дискретным переключением состояния отображаемой системы, выполняемым экспериментатором вручную, по заранее составленной жесткой или игровой программе на мнемосхему поступают также сигналы от модели системы, реализованной на аналого-дискретном вычислительном комплексе.

Дальнейшее развитие математической модели системы управления движением транспорта в г. Москве, несмотря на большие известные трудности формализации, необходимо для более точной профессиональной подготовки операторов системы к моменту ввода в эксплуатацию ее первой очереди, а также для перспективных психологических исследований процессов решения оперативных задач, соответствующих прогнозируемой

интенсивности движения транспорта на будущее (1980—1990 гг.), с целью совершенствования информационных средств, форм и алгоритмов взаимодействия операторов с ЭВМ.

Эксперименты, проведенные нашими аспирантами В. А. Вавиловым и А. А. Тэвиным, по оценке варианта мнемосхемы, реализованного в макете, показали, что прослеживание сети при раздельном изображении объектов (перекрестков) и сигналов их состояния существенно затруднено. Новый вариант мнемосхемы был выполнен с совмещенным отображением перекрестков и сигналов их состояния. В этом случае скорость прослеживания человеком маршрутов движения транспорта и общей оценки состояния системы существенно повысилась. Однако выяснилось, что и при таком изображении слишком высока реальная сложность решения оперативных задач, связанных с нормализацией работы системы в случае возникновения заторов движения и сбоев автоматических устройств. Анализ процессов решения задач, проведенный по методике, описанной в п. 5, показал, что причиной этого является большое число объектов и связей между объектами, включаемое испытуемым в решение задач. Как было показано ранее, эти факторы, обозначенные нами через $K_{1\text{P}}$ и $K_{7\text{P}}$, существенно влияют на скорость решения и число допускаемых ошибок.

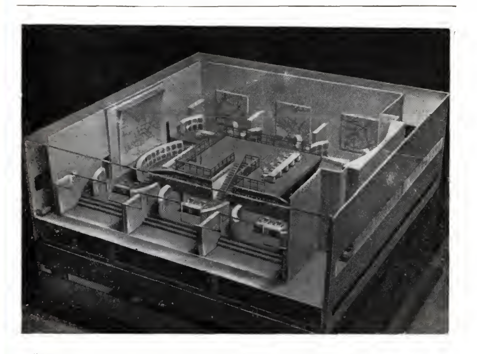
Для уменьшения значений этих факторов был применен принцип автономности. На основе анализа статистических данных об интенсивности движения транспорта по отдельным магистралям были выявлены районы дорожно-транспортной сети, в которых локализуются различные нарушения, возникающие в системе. Разделение мнемосхемы на такие районы условно показано на рис. 51. Например, при возникновении затора движения транспорта на какой-либо крупной магистрали могут быть найдены объездные пути, находящиеся вблизи данной магистрали, образующие некоторый относительно автономный подрайон. Границы такого подрайона могут быть проведены путем условного рассечения улиц и других элементов дорожно-транспортной сети, на которые приходится минимальная интенсивность движения транспорта в нормальных условиях и в процессе ликвидации нарушений режима работы системы. Зрительное разделение мнемосхемы системы на такие автономные подрайоны, выполненное нами путем варьирования цвета районов, облегчило выбор объектов и связей между ними, которые следует учитывать при возникновении внутрирайонных нарушений работы системы. Таким образом, сложный район, расположенный внутри Садового кольца, образующий первую очередь системы «Старт», в процессах оценки ситуации и решения оперативных задач представляет для человека-оператора меньшую реальную сложность благодаря зрительному делению его на подрайоны. Учитывая, что локализация нарушений режимов и процессов их регулирования носит статистический характер и, таким образом, в определенных,



51 *Мнемосхема первой очереди системы «Старт»*

хотя и сравнительно редких случаях, возможны изменения границ таких подрайонов, их цветовое разделение выполнено не контрастно, а нюансно.

Полная оперативная информация представляется методом комбинирования интегральной и детальной информации, исследованным в п. 13. Интегральная информация, отображаемая на мнемосхеме, сочетается с детальной, представляемой на дисплее и телевизионном полиэкране. Разделение интегральной и детальной информации производится в данном случае во времени и в пространстве. Дисплей встроен в оперативную панель пульта. Вопрос выбора конструкции и места расположения дисплея и клавиатуры для его управления решался с помощью специальных посадочных макетов пульта. Следует подчеркнуть, что применение разного рода макетов очень важно в процессе художественного конструирования оборудования пунктов управления. Особенно это относится к случаям создания принципиально новых АСУ, не имеющих действующих аналогов. Это в полной мере относится, в частности, к системе «Старт».



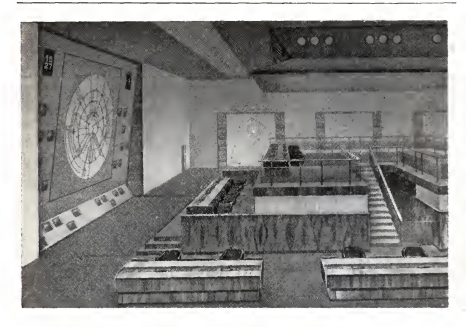
52 *Общий вид пункта управления системы «Старт» (макет)*

Для более полного воспроизведения деятельности операторов системы «Старт» в нашей лаборатории были созданы специальные действующие макеты дисплеев и видеоконтрольных устройств, основанные на принципе имитации их визуальных информационных характеристик.

Особую проблему представляет организация комплексного оборудования пункта управления системы «Старт», если иметь в виду ее полный объем: диспетчерский пункт транспортной системы города и семь районных операторских пунктов. Для облегчения взаимодействия между диспетчерами и операторами, особенно с операторами района внутри Садового кольца при внедрении первой очереди системы, нами совместно с архитектором Ю. С. Лапиным разработана двухъярусная компоновка всех пунктов управления в общем помещении размером 30×30 м. Вид помещения можно представить по фото макета (рис. 52) и планшету перспективы интерьера (рис. 53).

При внедрении первой очереди системы предусматривается, что пульт диспетчеров по городу будет временно располагаться перед мнемосхемой Садового кольца во втором ярусе.

Широкое применение инженерно-психологических принципов построения СОИ, а также экспериментальных макетов и моделей информационных средств и пультов управления по-



53 *Интерьер пункта управления системы «Старт» (проект)*

зволило решить целый ряд вопросов, связанных со снижением сложности решения оперативных задач на этапе проектирования пункта управления системы принципиально нового типа.

28

Психологический и эргономический анализ деятельности операторов и реконструкция операторского пункта на Щекинском химкомбинате

Повышение производительности действующих предприятий является важной государственной задачей. Как известно, большой опыт в решении этой задачи накоплен на Щекинском химкомбинате. В повышении производительности труда на химкомбинате важную роль сыграли такие мероприятия, как модернизация оборудования, расширение зон, обслуживаемых каждым работником, уменьшение численности вспомогательного персонала. Среди многих других методов на химкомбинате был применен и эргономический анализ рабочих мест, по результатам которого в дальнейшем была проведена рационализация рабочих мест операторов.

Когда на Щекинском химкомбинате начиналось движение за повышение эффективности производства, получившее впоследствии название «щекинский эксперимент», руководство химкомбината обратилось к ВНИИ технической эстетики с просьбой принять участие в совершенствовании управления одним из важнейших участков предприятия — аммиачным производством. Предстояло создать проект реконструкции центрального пункта управления (ЦПУ) аммиачного производства с учетом требований эргономики и технической эстетики. Лабораторией ВНИИТЭ, руководимой автором, вместе со службой контроля и автоматизации Щекинского комбината был проведен эргономический анализ труда операторов (аппаратчиков) и разработан художественно-конструкторский проект реконструкции ЦПУ.

В отличие от создания и внедрения художественно-конструкторских проектов новых операторских пунктов, при реконструкции накладывается целый ряд ограничений, связанных с тем, что работы ведутся на действующем объекте. Поэтому был разработан план проведения реконструкции без остановки технологического объекта.

Эргономический анализ включал в себя подробное обследование организации оперативного управления, системы автоматизации, обязанностей каждого сотрудника, эффективности использования технологических мощностей, причин нарушения режима работы (неплановых остановок оборудования, аварий), методов подачи информации аппаратчикам. Критически были оценены эстетические качества интерьера и компоновка оборудования ЦПУ, гигиенические условия работы аппаратчиков. Предварительно была разработана общая методическая схема проведения эргономического анализа деятельности аппаратчиков, которая предусматривала проведение работы в несколько этапов: 1. Общий предварительный анализ деятельности «крупным планом». 2. Более детальный предварительный анализ с применением контрольной эргономической карты. 3. Количественное уточнение факторов, влияющих на деятельность операторов, путем сопоставления данных, полученных в предварительном анализе, с конкретными эргономическими рекомендациями. 4. Выявление резервов производительности труда операторов и разработка рекомендаций по реконструкции оборудования и интерьера ЦПУ.

Общий предварительный анализ деятельности операторов был направлен на выяснение следующих вопросов.

1. Каковы цель и назначение данной операторской профессии?

2. Каковы функции человека и какие функции выполняют средства автоматизации?

3. При каких условиях протекает деятельность человека?

4. Каковы требования к скорости и точности действий оператора при разных режимах работы оборудования, в том числе при возникновении аварийных ситуаций?

5. Соответствуют ли применяемые средства отображения информации психофизиологическим особенностям восприятия и переработки информации человеком? Учтены ли при размещении приборов и средств сигнализации такие факторы, как их относительное значение, частота и последовательность использования аппаратчиком, функциональные связи между отображаемыми параметрами?

6. Соблюдена ли логика связи между приборами и соответствующими органами управления?

7. Сведены ли к минимуму маршруты осмотра необходимых оператору показаний приборов и обхода панелей, на которых расположены взаимосвязанные органы управления?

Общий анализ показал, что в первоначальной организации труда аппаратчиков многие эргономические требования не учитывались, и подтвердил необходимость более глубокого изучения условий труда аппаратчиков и их рационализации.

На втором этапе анализа был применен один из наиболее простых, эффективных и широко распространенных на практике способов эргономического обследования рабочих мест, который основан на применении так называемых эргономических контрольных карт [124]. Подобная карта представляет собой обширный перечень вопросов, по которым производится качественная экспресс-оценка отдельных элементов рабочих мест. Пользуясь эргономической контрольной картой, следует последовательно ответить на те ее вопросы, которые существенны для обследуемого операторского пункта, произвести необходимые замеры, сравнить результаты осмотра и измерений с нормами и требованиями эргономики и дать предварительное заключение по рабочим местам с рекомендациями по их более тщательному изучению, реконструкции или реорганизации.

В ходе эргономического анализа рабочих мест аппаратчиков ЦПУ аммиачного производства Щекинского химкомбината были обнаружены серьезные недостатки в организации деятельности аппаратчиков и выявлены резервы повышения производительности их труда и сокращения численности вспомогательного обслуживающего персонала.

Основными элементами исходного операторского пункта являлись приборный щит (общая длина около 30 м) и четыре пульта с органами управления и микромнемосхемами на приставках к пультам.

С центрального операторского пункта цеха аммиака Щекинского химкомбината управляются три технологических отделения: конверсии метана, моноэтаноламиновой очистки и синтеза аммиака. Одно отделение обслуживают 2 аппаратчика, каждый из которых работает на закрепленном за ним участке, а также старший аппаратчик, ответственный за работу отделения в целом. Здесь же на операторском пункте находится начальник смены, который координирует работу всего технологического комплекса производства аммиака.

Вся деятельность аппаратчика может быть подразделена на периоды в соответствии с режимом работы цеха: а) поддержание (стабилизация) нормального технологического режима (70—80% рабочего времени); б) ликвидация отклонений технологических параметров (обычно 4—6, но иногда до 10 раз и более за смену); в) ликвидация аварий или серьезных отклонений параметров, могущих повлечь за собой аварию (в среднем

4 раза в неделю). В каждый период работа аппаратчика имеет, с точки зрения эргономики, свои специфические особенности.

При нормальном ходе технологического процесса в обязанности аппаратчика входит: 1) следить за состоянием технологического процесса по приборам, находящимся на приборных панелях (на одного аппаратчика приходится от 4 до 8 стандартных приборных панелей, в среднем на панели расположено 6 приборов), сопоставляя показания приборов с заданными величинами параметров; 2) периодически снимать показания приборов и заносить их в специальный журнал (через каждые 2 ч в отделении компрессии и через каждые полчаса в других отделениях); 3) 2 раза в смену проверять состояние оборудования своего участка, помещающегося вне операторского пункта на открытых площадках (каждый обход участка и проверка оборудования занимают около 40 мин); 4) систематически проверять состояние датчиков, расположенных в отдельно стоящем блоке.

В отсутствие одного из аппаратчиков обязанность следить за ходом технологического процесса его участка возлагается на старшего или второго аппаратчика этого же отделения.

В течение смены при нормальном ходе технологического процесса отсутствие каждого аппаратчика составляет около 3 ч:

2 раза по 40 мин — обход оборудования; 1 раз в течение каждого часа — 10—15 мин — проверка состояния оборудования в блоке датчиков. При возникновении повреждений оборудования помещение пункта управления часто приходится оставлять аппаратчику и старшему аппаратчику. Тогда в обязанность оставшегося аппаратчика входит наблюдение за ходом технологического процесса всего отделения, отражаемого на 15 приборных панелях (до 90 приборов).

В случае возникновения в этот период каких-либо дополнительных отклонений от нормы возникает очень напряженная ситуация, так как одному человеку очень трудно справляться с их ликвидацией.

При нормальном протекании технологического процесса аппаратчик осуществляет в основном контрольную деятельность. Для этой деятельности характерны значительная сосредоточенность внимания и в то же время его постоянное распределение при сопоставлении показаний многочисленных приборов, контролирующих взаимосвязанные параметры, быстрая актуализация (припоминание) знаний, касающихся как общей схемы производственного процесса, так и значений и связей отдельных параметров. Особенно трудно соотнесение взаимосвязанных параметров.

При отклонении от нормы какого-либо параметра, о чем извещают зуммер и вспыхнувшая на мнемосхеме сигнальная лампочка, аппаратчик должен выключить зуммер (квитировать звуковую сигнализацию), затем по положению загоревшейся лампочки определить, на каком агрегате произошло нарушение режима, найти те приборы на щите, которые связаны с возникшим отклонением.

По показаниям приборов аппаратчик должен установить направление (знак) и величину отклонения, найти причину отклонений и способ их ликвидации и воздействовать на исполнительные органы объекта, чтобы восстановить нормальный ход технологического процесса.

Иными словами, в этот период аппаратчик осуществляет диагностирование ситуации и принятие решения и затем выполняет действия по устранению нарушений в производственном процессе. Прежде всего аппаратчик должен установить причину, вызвавшую отклонение данного параметра.

Для этого ему необходимо, мысленно прослеживая весь ход технологического процесса, выявить связи между отклонившимся и другими параметрами и представить, следствием каких причин могут быть те или иные изменения, затем выяснить, какая из этих причин имела место в данный момент. Чаще всего это устанавливается в процессе особой аналитической деятельности — перебора и оценки вариантов. Например, зуммер и загоревшаяся на мнемосхеме лампочка известили аппаратчика о появлении отклонения от нормального процесса в работе определенного агрегата. Прослеживая показания приборов, относящихся к данному агрегату, и сопоставляя их показания с заданными величинами, аппаратчик установил, что сигнал связан, скажем, с падением уровня в регенераторе. Он предполагает, что причиной является недостаточная подача воды. Тогда аппаратчик увеличивает подачу воды, повышая производительность насоса, и наблюдает по приборам за состоянием уровня. Через некоторое время становится ясно, что, несмотря на принятые меры, уровень продолжает падать. Рабочая гипотеза аппаратчика не подтвердилась. Тогда он предполагает, что причиной падения уровня является зависание раствора в регенераторе, и принимает меры по ликвидации этого положения: снижает расход пара и регулирует температуру верха и низа до восстановления нормального перепада, наблюдая одновремено за целой группой приборов. Уровень постепенно устанавливается на заданной отметке. В некоторых случаях аппаратчик должен проверить состояние прибора не только на щите, но и в блоке датчиков, а также осмотреть оборудование на открытой площадке.

Серьезным недостатком данной системы оперативного управления являлась неполная механизация — отсутствие некоторых электро- и пневмоприводов с дистанционным управлением. В результате часть параметров регулировалась дистанционно со щита, а часть — вне помещения, непосредственно на объекте. Это очень затрудняло работу аппаратчиков. Например, при измерении давления парогазовой смеси аппаратчик отмечал отклонение по ряду приборов, указывающих расход пара и его температуру, затем шел на открытую площадку открыть обводную магистраль, по возвращении опять следил за изменением процесса по приборам. Если в результате принятых мер процесс не нормализовался, аппаратчик снова возвращался к обводной магистрали и приборам.

На устранение неполадок часто уходило много времени. Если же режим работы нарушался в нескольких местах, создавалась угроза аварии и остановки оборудования, что влекло за собой большие экономические потери.

Повышение уровня механизации процессов с целью перевода всех основных агрегатов на управление непосредственно с ЦПУ было признано первым резервом повышения эффективности аммиачного производства.

Далее анализу были подвергнуты щитовые контрольно-измерительные приборы. Существенным недостатком первоначально использовавшихся приборов являлась их большая разнородность по величине, форме, структуре шкал и цветовому решению.

Различную форму и цвет корпусов приборов можно использовать для улучшения ориентировки оператора, но шкалы аналогичных приборов должны быть сходными.

Обследование показало, что не во всех случаях проектировщиками соблюдались принципы рациональной компоновки приборов. Из-за этого, например, при падении давления пара аппаратчик был вынужден последовательно переходить от 19 к 18-й, затем к 17 и 16-й панели, где разбросаны приборы, измеряющие связанные между собой расход и давление пара. Поскольку при этом одновременно необходим контроль температурного режима, он от 16-й панели возвращается к 20-й, затем опять идет обратно к 18, 17 и 15-й. Соответствующий этим операциям маршрут обзора — суммарное расстояние между точками фиксации взгляда составляло около 30 м.

При осмотре приборов в этой довольно типичной ситуации аппаратчик должен пройти вдоль щита свыше 15 м, а ведь успех дела в первую очередь зависит от скорости его действий.

Расчеты показали, что маршруты обзоров при некоторых нарушениях режимов были так велики, что на их протяжении в оперативной памяти человека сохранялось недостаточное количество информации для диагностирования этих ситуаций. Установлено, что диагностирование с опорой на приборные щиты с нерациональной компоновкой индикаторов объективно затруднено либо вообще невозможно независимо от квалификации оператора. Кроме того, при наблюдении попеременно за приборами, находящимися на разных расстояниях от аппаратчика, возникает необходимость постоянной перестройки конвергентного аппарата глаз, что является причиной форсированного зрительного утомления.

Улучшение подбора и размещения приборов было признано вторым резервом рационализации труда аппаратчиков.

При обследовании были обнаружены некоторые элементарные промахи конструкторов. Например, тумблеры выбора параметров, закрепленных за одним измерительным прибором (японского производства), не имеют фиксированного положения «Включено». В результате получалось, что считывать показания на приборе можно было лишь в том случае, когда аппаратчик нажимал на тумблер, но при этом он еще должен был вписывать в журнал показания прибора. Тем самым совершенно бессмысленно увеличилась нагрузка на память оператора.

На многих приборных панелях нижний ряд приборов был расположен слишком низко, на расстоянии 0,45—0,55 м от пола, так что их показания вообще не читались аппаратчиком, стоящим вблизи щита в нормальной позе.

На операторском пункте цеха аммиака оказался нарушен принцип пространственного сопоставления связанных между собой средств контроля и органов управления. Вследствие этого была высока вероятность ошибочных действий, затруднено обучение операторов и приобретение ими необходимого «автоматизма» навыков, что особенно важно для действий в аварийных условиях. Органы управления были расположены частично на щите, а частично на пульте. Это значительно затрудняло задачи аппаратчика.

Для примера рассмотрим последовательность действий аппаратчика при ликвидации типичной аварийной ситуации — загорания природного газа в смесительном канале — при прежней организации труда.

После того как появлялись соответствующие световой и звуковой сигналы, аппаратчик производит следующие манипуляции.

1. Отключает сигнализацию и переводит на пульте в положение «дистанционно» отсекатели, чтобы отключить автоматику и прекратить подачу газа.

2. Отключает на пульте регулятор соотношения природного газа и кислорода и закрывает клапан подачи кислорода.

3. Переводит на пульте подачу газа в положение «Дистанционно» и закрывает клапан подачи газа.

4. Переводит на пульте подачу пара в положение «Дистанционно» и открывает клапан, увеличивающий подачу пара.

5. Увеличивая расход пара с помощью задатчика, расположенного на щите, следит за температурой в смесительном канале и доводит ее до нормальных пределов.

6. Открывая на пульте клапан, восстанавливает подачу газа.

7. Открывает отсекатель газа (на пульте).

8. Открывает клапан кислорода (на щите).

9. Открывает отсекатель кислорода (на пульте).

10. Снижает до нормы давление пара (на щите).

11. Восстанавливает нормальное соотношение газа и кислорода (на щите).

12. Переводит отсекатели (на пульте) на автоматическое управление.

13. Попеременно на щите и пульте переводит подачу газа, кислорода и пара с ручного регулирования в автоматическое.

Таким образом, на этом примере видно, что во время ликвидации аварийной ситуации аппаратчику приходилось 8—9 раз переходить от пульта к прибору и обратно, а также передвигаться вдоль щита, так как функционально связанные органы управления были установлены в разных местах.

Кроме того, расположение органов управления на пульте не соответствовало расположению приборов, относящихся к ним. Так, если контрольно-измерительные приборы первого, второго, третьего и четвертого агрегатов были расположены на щите в направлении слева направо, то их органы управления на пульте — справа налево.

По замыслу авторов первоначального проекта все основные действия должны были производиться оператором, сидящим за пультом. Однако, как видно из проведенного анализа, это невозможно, поскольку на щите расположены приборы типа АУС с задатчиками авторегуляторов. Кроме того, размеры многих приборов, читаемость их шкал, модуль оцифровки, размещение на щите таковы, что аппаратчик не мог прочесть их показаний из-за пульта с расстояния 3—3,5 м. В довершение всего надо отметить, что конструкция пульта такова, что за ним сидеть очень неудобно. В результате аппаратчик обычно либо сидел за отдельным столом, либо находился в непосредственной близости от приборов, между щитом и пультом. При этом в значительной степени утрачивала свою роль система сигнализации на мнемосхеме, размещенной на приставке к пульту. Следовательно, увеличивались нагрузка на внимание и память аппаратчика: отклонения параметров должны были улавливаться им по показаниям приборов, что требовало напряженного слежения; технологическая схема должна была запоминаться наизусть. При выполнении же переключений на

пульте аппаратчик, не видя показаний приборов, терял обратную связь — контроль за результатом своих действий, что значительно снижало точность его воздействий и увеличивало время, затрачиваемое на выполнение операций, в том числе на пуск агрегатов, регулирование параметров. Рационализация компоновки органов управления была признана третьим резервом повышения эффективности труда аппаратчиков.

Основные положения проекта реконструкции. Необходимо было реконструировать элементы операторского пункта так, чтобы аппаратчик при всех переключениях органов управления мог без напряжения следить за показаниями приборов и зрительно опираться на мнемосхему, а в остальных случаях, при отсутствии сигналов, был освобожден от необходимости напряженно следить за показаниями приборов.

В первую очередь надо было выбрать наиболее рациональный в данном случае тип мнемосхемы. Первоначальные мнемосхемы аммиачного производства являлись неоперативными микромнемосхемами, размещенными на приставках к пультам управления. В информационной системе они составляли первый план представления информации о состоянии управляемого объекта. Второй план — приборный щит — был удален от первого. Такая компоновка лишала целостности процесс восприятия информации оператором. На основе данных эргономического анализа было признано необходимым объединить оба информационных плана путем замены неоперативных микромнемосхем неоперативными мнемосхемами, расположенными на надстройке к приборному щиту.

Относительно небольшое число органов управления, размещавшихся на пульте, было предложено перенести на щит и расположить на оптимальной высоте 1,2—1,6 м от уровня пола, частично вблизи приборов контроля, частично на дополнительных панелях.

В результате анализа были выявлены недостатки в интерьере ЦПУ. В помещении ЦПУ кроме пультов было несколько столов, много лишней аппаратуры. Не было изолировано защитовое пространство, предназначенное для прибористов-ремонтников. Панели щита пятого агрегата были расположены в отрыве от других, на фоне окна. Все это мешало работе аппаратчиков. Упорядочение компоновки оборудования и интерьера, изъятие лишнего оборудования, улучшение освещения — это были также важные резервы повышения эффективности труда аппаратчиков.

Поскольку в системе управления аммиачным производством, как и на многих действующих предприятиях, управление которыми должно быть модернизировано, нет устройств, уплотняющих вывод информации на СОИ (таких как, например, информационные вычислительные машины или избирательные системы контроля), особое значение приобретают сокращение общего числа приборов и рационализация их компоновки на щите.

Комбинируя изложенный в гл. 3 принцип отбора представительной информации в недетерминированных АСУ ТП с экспериментальным подходом, примененным при исследовании оптимальных значений оперативного объема отображаемой информации (см. гл. 6), мы составили методическую схему выбора числа приборов, на которые выводятся контролируемые параметры объекта, и расчета оптимального варианта компоновки приборов на СОИ.

Методика иллюстрируется на рис. 54, которому для простоты понимания придан условный характер.

1. Из анализа работы объекта отбирается наиболее представительная информация (рис. 54, *а*), затем по испытаниям объекта или его динамической модели устанавливается зависимость средних удельных потерь $\bar{Y}_i$ от величины отклонения различных параметров ΔM_i (рис. 54, *б*).

2. Из этих же источников могут быть получены распределения отклонений параметров (рис. 54, *в*), а также распределения потерь при отклонении отдельных параметров (рис. 54, *г*).

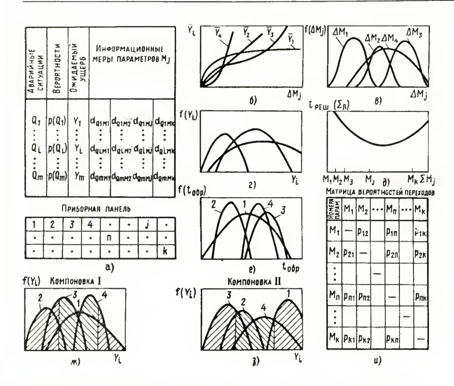
3. Рассчитывается функциональная или статистическая связь среднего значения потерь и некоторого практически приемлемого критерия оценки эффективности деятельности оператора, допустим, среднего времени обработки одного сигнала $t_{об}$.

4. Время диагностирования ситуации и решения задачи ($t_{реш}$) и число ошибок ($\sum\beta$) имеют тенденцию сначала уменьшаться при увеличении числа отображаемых сигналов, а затем увеличиваться, когда появляются иррелевантные сигналы. Оптимум этих функций при изменении $\sum M_i$ обычно выражен не очень четко, но область предпочтительных чисел сигналов может быть таким образом определена (рис. 54, *д*).

5. Анализ деятельности оператора описанными ранее методами теории массового обслуживания (см. п. 17) позволяет получить эмпирические распределения значений выбранного критерия эффективности обработки сигналов в зависимости от места расположения отображающих их приборов на панели (рис. 54, *е*).

6. Если сигналы полностью независимы, то можно на основе распределений, представленных на рис. 54, *г* и *е*, а также связей y_i и $t_{об}$ рассчитать распределения потерь по отдельным каналам регулирования (y_1, y_2, . . .) при нескольких вариантах компоновки приборов, отображающих параметры x_1, x_2 (рис. 54, *ж*).

7. Сравнение вариантов компоновки может быть произведено путем сравнения распределений соответствующих им потерь, например, по средним вероятностям нахождения отдельных потерь в определенных оценочных интервалах, ограниченных на рис. 54, *ж* и *з* вертикальными линиями (см. п. 21 и рис. 35).



54 *Методическая схема выбора контролируемых параметров и расчета оптимальной компоновки приборов*

В зависимости от конкретных условий работы объекта устанавливаются оценки и сравниваются площади соответствующих заштрихованных зон.

При анализе технологических процессов выявлены многочисленные статистические связи между параметрами, отображаемыми на различных приборах. Тогда переход от прибора n к прибору $n + m$ совершается оператором чаще, чем к прибору $n + q$ и всем другим. В этом случае варианты компоновки, сравниваемые по распределениям потерь, составлялись на основе расчета матрицы вероятностей переходов оператора от одного прибора к другому (рис. 54, *и*) по методу, предложенному А. Чапанисом [133, 134], позволяющему минимизировать маршруты обзора приборов.

На основе данных проведенного анализа и расчетов было составлено техническое задание на проект реконструкции ЦПУ. В соответствии с проектом все наиболее важные и часто используемые органы управления были механизированы, и переключение их ведется теперь с ЦПУ. Повышена надежность датчиков.



55 *Общий вид операторского пункта аммиачного производства Щекинского химкомбината после реконструкции*

Аппаратчик получил возможность больше находиться у пульта управления и реже выходить на открытые площадки. Улучшилась обзорность щита. Ключи регулировки были перенесены с пульта на панели, ближе к соответствующим приборам, а пульты аннулированы. Теперь при нормальной работе оборудования аппаратчики сидят за столами, на которых находятся телефоны, журналы регистрации, инструкции. Мнемосхема, органы управления и приборы, относящиеся к одному агрегату, скомпонованы вместе.

Мнемосхемы технологического производства разработаны заново (рис. 55).

Существовавшие до реконструкции мнемосхемы не могли быть механически перенесены на надстройку к щиту по целому ряду обстоятельств. Во-первых, к структурным характеристикам неоперативной мнемосхемы, расположенной на надстройке к щиту, предъявляются иные и обычно более строгие требования, чем к мнемосхеме, размещенной на приставке к пульту, непосредственно перед оператором.

Первоначальная мнемосхема была фактически скопирована составителями с технологической схемы процесса, назначение которой принципиально иное. Здесь ими не было учтено то обстоятельство, что аппаратчик не ставит перед собой цели изучить технологический процесс. Его задача — опираясь

на изображение мнемосхемы, с помощью приборов контроля и системы сигнализации сформировать представление о действительном состоянии управляемого технологического процесса. Мнемосхема должна служить информационной динамической моделью объекта.

Механическое повторение в мнемосхеме принципиальной технологической схемы процесса отрицательно сказалось и на художественной выразительности композиции рисунка. В частности, в прежней мнемосхеме не нашли своего отражения основные закономерности композиционного построения графического изображения, такие как масштаб, пропорции и ритм; контуры агрегатов и устройств были излишне раздроблены и детализированы; отсутствовала унификация условных обозначений родственных агрегатов и устройств.

Наряду с применением общих эргономических принципов компоновки мнемосхем (см. п. 14) при проектировании новой мнемосхемы ЦПУ аммиачного производства в результате анализа работы оператора в различных ситуациях было максимально упрощено графическое изображение технологического процесса, изъяты отдельные обозначения агрегатов и элементы изображения, не дающие оператору нужной информации. Кроме того, сведено к минимуму число пересечений технологических линий и их изгибов; размеры условных обозначений агрегатов и устройств выбраны с учетом их важности; были найдены пропорции между размерами символов основных агрегатов, вспомогательных устройств, технологических линий и сигнальных элементов; символы технологических агрегатов были обобщены и унифицированы; большое внимание было уделено цветовому решению мнемосхемы.

Существенно изменился интерьер помещения ЦПУ. Подвесной потолок выполнен из звукопоглощающей плитки, в него встроены светильники. Особое внимание уделено равномерному освещению мнемосхемы и приборных панелей.

Внедрение проекта модернизации ЦПУ аммиачного производства на Щекинском химкомбинате дало следующие результаты.

1. Повысилась культура эксплуатации технологических объектов, более строго стали соблюдаться режимы, сократилось число нарушений режима и ошибок при их устранении. Время устранения серьезных нарушений режима уменьшилось в среднем на 15%.

2. Общая численность вспомогательного персонала, обслуживающего ЦПУ, сократилась на 20 человек (с 49 до 29).

3. Улучшились условия работы аппаратчиков. На ЦПУ поддерживается образцовый порядок, более четко определены обязанности каждого аппаратчика. Выделены изолированные рабочие места прибористам.

4. Все затраты на эргономические исследования, разработку художественно-конструкторского проекта и его реализацию (35,5 тыс. руб.) окупились в течение года. Основная часть работ выполнена КБ и мастерскими Щекинского химкомбината в периоды их недогрузки. В разработке и внедрении проекта реконструкции с особым энтузиазмом участвовали аппаратчики аммиачного производства.

Положительные результаты изучения и рационализации деятельности операторов на Щекинском химкомбинате были отмечены Б. Ф. Ломовым в докладе «Состояние и перспективы развития психологии в СССР» на IV съезде Общества психологов СССР [78].

Опыт показывает, что комплексный эргономический анализ рабочих мест наряду с широким использованием механизации и автоматизации управления и достижений технической эстетики является действенным средством повышения эффективности производства, улучшения условий работы, подъема производительности труда и должен проводиться в широких масштабах.

* *
*

Широкое распространение АСУ технологических производств и повышение ответственности и сложности функций человека-оператора в этих системах выдвигает важную комплексную психологическую и научно-техническую проблему, связанную с разработкой теории и принципов синтеза многокомпонентных систем и средств отображения оперативной информации.

В работе предложен и развивается структурно-психологический метод решения этой проблемы, основанный на исследовании вероятностного влияния структуры системы отображения информации на психологические факторы сложности оперативных задач. На основе анализа деятельности операторов многих АСУ выявлен достаточно полный набор факторов, статистически обусловливающих различия в эффективности деятельности и сдвигах психофизиологических показателей в процессе решения задач и количественно определяемых составом и структурой средств отображения информации. Для изучения процессов решения реальных оперативных задач, возникающих перед человеком в АСУ, разработан ряд новых экспериментальных методов исследования деятельности, обеспечивающих возможность переноса их результатов в практику проектирования информационных систем. На основе большого экспериментального материала сформулированы принципы рационализации структуры информационных моделей, снижающие сложность решения оперативных задач человеком, разработаны теоретические и методические основы художественного конструирования мнемосхем АСУ, предложен ряд оригинальных типов информационных моделей, в том числе найден принципиально новый обширный класс условно-абстрактных средств отображения информации. Практическая проверка теоретических и экспериментальных исследований осуществлена в ходе художественного конструирования, внедрения и последующей оценки систем отображения информации ряда круп-

ных АСУ технологических процессов в различных отраслях производства.

Остановимся более подробно на некоторых конкретных психологических и научно-технических результатах работы.

Комплекс разработанных методик исследования и полученные данные о статистическом влиянии состава и структуры оперативно-информационной модели на сложность решения оперативных задач закладывает основы структурно-психологической теории оптимального синтеза многокомпонентных систем отображения информации для АСУ. Принципиальное отличие структурно-психологической теории состоит в том, что она дает возможность помимо традиционного сравнения и констатации превосходства по выбранному критерию одного варианта СОИ над другими находить пути построения оптимального варианта, минимизирующего отклонения факторов сложности оперативных задач от их оптимальных значений.

Представительность выявленных психологических факторов сложности проверена на большом числе типичных примеров деятельности операторов технологических АСУ, выбранном в соответствии с проведенной классификацией систем управления и функций операторов.

Применение данного метода позволяет ориентировать психологический анализ деятельности и процессов решения человеком оперативных задач на получение количественных данных, необходимых для сопоставления вариантов, расчета и проектирования оптимальных СОИ. В ходе исследования явления системно-психологической индукции установлено, что, несмотря на сложный динамический и многовариантный характер структуры оперативно-психической модели системы и процессов решения и индивидуальные различия между операторами, некоторые компоненты процесса решения и особенно его информационной подготовки отличаются большой стабильностью и определяются наряду со свойствами управляемого объекта способом представления информации о его состоянии. Разработан и применен ряд новых методических приемов анализа деятельности, позволяющих более точно воспроизводить в психологических экспериментах существенные черты реальной деятельности человека-оператора и таким образом повышать достоверность и практическую применимость результатов психологических исследований.

В частности, в экспериментальную практику введены реальные оперативные задачи, выявляемые в ходе психологического анализа деятельности операторов на объекте и решаемые в лаборатории с опорой на реальные информационные модели. Впервые в экспериментальной психологии применено внесение планомерных аварийных возмущений в работу крупного технологического объекта, что позволило выявить существенные особенности деятельности человека-оператора в реальной стрессовой ситуации. При этом обнаружено снижение способности

человека дифференцировать сигналы по важности, выражающееся в завышении значимости некоторых второстепенных сигналов и неоправданном включении их в число наиболее экстренных и важных, что существенно увеличивает время ликвидации аварии. Данные этих экспериментов послужили основой для постановки проблемы регулирования интенсивности потока сигналов, поступающих к человеку-оператору, и создания особого класса информационно-демпфирующих систем.

Весьма эффективным для лабораторных исследований процессов взаимодействия человека-оператора с динамическими системами оказалось использование математических моделей управляемых объектов, реализованных на вычислительных машинах. С применением экспериментальной моделирующей установки изучено влияние разного типа визуальных информационных моделей на общую (качественную) и количественную оценку изменения параметров системы. Оказалось, что структура процессов слежения существенно зависит от скорости и характера протекания регулируемых процессов — динамических свойств объекта. Выше определенного уровня сложности динамических свойств для обеспечения эффективного слежения необходимо облегчать человеку-оператору антиципацию (предвидение) изменений параметров, представляя графически переходные процессы с соответствующей скоростью их развертки во времени. Для особенно сложных систем, не поддающихся пока математическому моделированию, таких как энергообъединение, в экспериментах использовано психическое моделирование специально подготовленным ведущим (диспетчером высшей классификации) динамики системы в зависимости от исходной задачи и действий испытуемых (диспетчеров). Это позволило исследовать процессы решения задач, лишь частично отображенных на информационной модели и требующих получения по другим каналам большого количества дополнительных сведений, необходимых для адекватной оценки реального состояния управляемой системы.

Сопоставление динамики объектов и их психического отражения человеком обусловило введение понятия оперативно-психической модели управляемого объекта, характеризующее системное психическое отражение конкретного состояния объекта, включающее различные формы (восприятие, сенсомоторные реакции, представление, образное и словесно-логическое мышление).

В отличие от принятых в психологии представлений, выражаемых понятиями «концептуальная модель», «оперативный образ», «мозговая модель» и т. п., для психического отражения управляемой системы характерно не только развитие в ходе обучения индивидуума, но и вариативность, целенаправленная мобильность, позволяющая оперативно уподоблять с доступной

степенью адекватности психическое отражение каждой из огромного числа возможных ситуаций в реальной системе, и на этой основе решать соответствующие оперативные задачи. Причем в разных ситуациях знания о разных элементах системы репродуцируются с различной степенью подробности и в разных планах, образуя как бы особый, соответствующий возникшему нарушению в работе системы диагностический разрез ее структуры (физико-технологической, функциональной, динамической и т. д.). Поскольку, кроме того, знания об объекте могут при осознании исходных условий задачи репродуцироваться, а в процессе решения новых задач продуцироваться не только в словесно-логической (понятийной), но и нагляднообразной (визуализированной), а также сенсомоторной и других формах, термин «оперативно-психическая модель управляемой системы» является более общим и адекватным с точки зрения анализа деятельности операторов, чем упомянутые выше термины. Вместе с понятием «психическая модель» он более удачно согласуется с терминами «оперативно-информационная» и «информационная» модели, облегчая трансляцию соответствующих им психологических и научно-технических знаний.

Разработаны принципы планирования психологических экспериментов по сравнительной оценке вариантов оперативно-информационных моделей, учитывающие влияние процессов обучения испытуемых.

Найдены методы приближенного аналитического расчета и эмпирического уточнения порядкового номера контрольного эксперимента, основанные на анализе статистической динамики обучения и сопоставлении показателей деятельности испытуемых и опытных операторов по технологически значимым критериям.

Получены данные о фазовой структуре процессов решения реальных оперативных задач. Путем совместного статистического анализа показателей эффективности решения и характеристик глазодвигательного поведения выявлен ряд дополнительных индикаторов сложности задач (число фаз по электроокулограмме, продолжительность фаз с длительностью фиксаций глаз $t > 1$ с).

Введен комплексный критерий сложности решения задачи — произведение среднего времени решения на число ошибок и на число фаз по ЭОГ.

Использование совокупности разработанных экспериментальных методов позволило успешно перенести в проектирование информационных моделей большинство результатов проведенных психологических исследований и разработать методы рационализации структуры информационных моделей, направленные на снижение сложности оперативных задач. Здесь можно назвать принципы компоновки мнемосхем, такие как лаконичность, автономность, структурность, стадийность, ак-

цент на элементах контроля и управления; способы снижения информационной избыточности мнемосхем путем разделения информации во времени (сменные мнемосхемы) и в пространстве (раздельная компоновка мнемосхем сложных АСУ ТП); метод оптимизации оперативного объема отображения введением приоритетов сигналов и демпфирующих устройств; комбинированное применение детальных и специального типа интегральных информационных моделей; зрительное выделение критичных элементов и контуров мнемосхемы как способ управления вниманием оператора и отображения человеку советов ЭВМ.

Показано, что для снижения сложности деятельности человека-оператора весьма важно применять при создании СОИ методы художественного конструирования, при разработке которых широко использовался богатейший творческий опыт, накопленный в разных областях изобразительного искусства и архитектуры.

Особое внимание при разработке структурно-психологической теории синтеза систем отображения информации уделено, наряду с качественным описанием деятельности, количественной представимости результатов психологических исследований. Методы количественного анализа найдены применительно к психологическим факторам сложности информационной подготовки и принятия решений, общим принципам выбора состава и структуры информационных моделей (например, оптимальная лаконичность — по минимуму вероятных потерь в управляемой системе, автономность — перегруппировкой матрицы взаимосвязей между параметрами объекта с учетом их плотности и т. д.).

Весьма эффективным для формального анализа взаимодействия человека-оператора с информационной моделью объекта оказался подход, основанный на применении идей и аппарата математической теории игр. Первоначально такой подход был нами предложен [21] и получил развитие в технической кибернетике [93] применительно к исследованию опознания образов, однако теперь очевидно, что одним из многообещающих направлений использования на основе этой математико-игровой концепции является также интенсификация экспериментальных психологических исследований деятельности человека-оператора с разными вариантами систем отображения информации.

Для количественного анализа процессов решения оперативных задач применен аппарат математической теории массового обслуживания, развитый дополнительно для случая параллельной обработки человеком сигналов (заявок). В качестве формальных моделей процессов решения задач человеком при временно́м и надежностном частных критериях предложены модификации марковских и полумарковских процессов.

Представляется, что для перспектив развития теории и тех-
 ники СОИ имеет существенное значение тот факт, что в работе

теоретически и экспериментально доказаны возможность и целесообразность абстрагирования при определенных условиях отображаемой информации от конкретной физико-технологической характеристики управляемых объектов при решении оперативных задач путем построения особого класса условно-абстрактных СОИ. Этот класс реализован, в частности, в виде структурно-динамических СОИ и командно-информационных мнемосхем, нашедших применение в системах контроля функционирования и предпускового состояния сложных объектов.

Сопоставительный анализ процессов проектирования обычных, ассоциативных и вновь предложенных условно-абстрактных СОИ и исследование деятельности операторов с этими двумя классами СОИ позволяют постулировать следующее положение.

Если человек-оператор включается в систему управления для решения (среди прочих) заранее неизвестных, неалгоритмированных задач, то полностью формальный априорный расчет состава и структуры средств отображения информации принципиально невозможен. При проектировании неизбежно применение неформальных — эвристических и экспериментальных методов.

Из этого постулата легко выводятся два следствия.

1. Если полностью формальный расчет средств отображения информации возможен, то возможно построение СОИ условно-абстрактного типа.

2. Если условно-абстрактное СОИ обеспечивает оператора полной информацией, необходимой для решения всего круга возложенных на него задач, то принципиально возможна автоматизация функций данного оператора.

Большое внимание было уделено исследованию влияния статистических характеристик потоков сигналов, поступающих к оператору, и объема одновременно представляемой информации на комплекс психофизиологических показателей и эффективность деятельности человека-оператора. Найдены количественные характеристики потоков сигналов, поступающих к оператору в разных режимах работы объекта, предложены принцип построения, а также экспериментальный и аналитический методы исследования информационно-демпфирующих систем с регулируемой интенсивностью потоков сигналов, поступающих к человеку-оператору. Проведено исследование информационно-демпфирующей системы на конкретном примере операторской деятельности. На большом экспериментальном материале доказано, что такое регулирование может служить средством снижения реальной сложности оперативных задач — повышения эффективности и уменьшения сдвигов психофизиологических показателей деятельности человека-оператора. Дальнейшее развитие идеи информационно-демпфирующих систем, возможно, приведет к построению класса инфор-

мационно-адаптивных систем, в которых производится оперативное изменение характеристик и функций технических элементов системы отображения информации в широком диапазоне с целью их лучшего приспособления к конкретному состоянию человека, его индивидуальным особенностям, эффективности деятельности и т. д.

В специальной серии экспериментов выявлено существенное влияние параметров внешней среды на темп и качество работы оператора. Причем при переходе из одной зоны внешних условий в другие обнаружены некоторые нелинейные сдвиги не только показателей, но и самой структуры деятельности, такие как возможное смещение оптимальной (по показателям эффективности) зоны восприятия, повышение точности и скорости зрительномоторной реакции при действии интенсивного шума, подтверждающие современную теорию сложного, системного механизма взаимодействия анализаторов в процессе многомодального восприятия и сенсомоторных реакций. На основе данных о нелинейном многофакторном влиянии средств и условий на деятельность человека как сложное целостное явление сформулированы взгляды на специфические задачи и методы исследований эргономики.

Существенный вывод из всей совокупности проведенных исследований состоит в том, что влияние внешних условий на деятельность человека-оператора сказывается в большей или меньшей степени в зависимости от способа представления ему информации.

Проведенные исследования показали, что путем выбора определенных объема и структуры информационной модели или оперативной адаптации ее характеристик к особенностям конкретной деятельности человека может быть достигнута очень высокая устойчивость («гиперстабильность») основных показателей деятельности в широком диапазоне изменения задач, режимов и внешних условий деятельности человека-оператора. Исследование в дальнейшем методов построения особых, оперативно-адаптивных систем отображения информации (вообще комплекса основных технических средств оперативного контроля и управления), служащих расширению и наиболее полному использованию способностей человека в централизованном управлении сложными автоматизированными системами и обеспечивающих гиперстабильность его деятельности и оптимальных в этом смысле, представляется весьма важной комплексной, психологической и научно-технической проблемой.

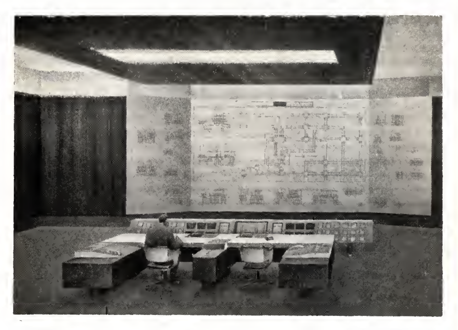
Показано, что в процессе художественного конструирования, создания СОИ необходимо учитывать многие требования и аспекты, в том числе психологические, технические, эстетические и другие, нередко вступающие между собой в противоречие. Вместо известного подхода, основанного на применении частных, трудно взаимно согласуемых критериев, с позиций

выдвинутой структурно-психологической теории синтеза СОИ выбор между альтернативными вариантами структуры СОИ может производиться с учетом единственного показателя — уровня сложности решения человеком оперативных задач. Как правило, должен учитываться весь комплекс выявленных факторов сложности задач, и лишь в частных случаях при условии особой проверки характера связей между факторами оценка СОИ может быть произведена по группам факторов. Принимая во внимание накопленный опыт исследований и создания СОИ, наиболее характерные группы перечислим в порядке убывания их важности: 1. Отображение различительных признаков ситуаций и возможность углубленного информационного исследования состояния объекта с разной степенью детализации его элементов (в эту группу входят такие факторы, как коэффициент интерференции K_{15P} и число нестандартных — технологических и аварийных — связей $K_{3P}^{т}$, $K_{3P}^{а}$). 2. Число операций в алгоритме решения задач K_{5P}, число оперативных единиц восприятия K_{10P}, число ступеней предвидимых оператором взаимосвязей K_{2P}. 3. Общее число связей между элементами, которое реально перебирает оператор при поиске релевантных данной задаче K_{1P} (прямых связей $K_{3P}^{п}$ и косвенных $K_{3P}^{к}$), их замаскированность на СОИ K_{14P}, а также число критических элементов ситуации K'_{7P}. 4. Общее число релевантных информационных элементов ситуации K_{7P}, коэффициент избыточности информации K_{4P}, число конкурирующих вариантов решения K_{13P}.

Здесь представлена средняя «иерархия» факторов, в каждом случае соотношение значений факторов должно быть уточнено в зависимости от специфики системы, оперативных задач и психологической структуры деятельности оператора.

С целью практической проверки и внедрения полученных результатов спроектированы и созданы комплексы информационных средств для ряда крупных АСУ технологических производств, в том числе для энергоблоков ТЭЦ-21 Мосэнерго, автоматизированных с применением управляющих вычислительных машин, цехов Воскресенского и Щекинского химкомбинатов, автоматизированного слябинга 1150 для металлургического комбината в румынском городе Галац, объединенных энергосистем Закавказья и Урала (см. рис. 56), системы централизованного управления движением транспорта в г. Москве (системы «Старт»).

Комплексное применение научно-технических, инженерно-психологических и художественно-конструкторских методов в процессе синтеза систем отображения информации для этих АСУ позволило впервые решить ряд весьма сложных задач, таких, например, как организация надежного управления одним человеком работой двойного теплофикационного энергоблока, в том числе при сбоях в работе и отключениях управляющей



56 *Вариант проекта диспетчерского пункта ОЭС Урала*

вычислительной машины, централизованная оперативная диспетчеризация всех режимов работы слябинга 1150, инженерно-психологическая рационализация диспетчерского управления объединенными энергосистемами.

Внедрение результатов проведенных исследований позволило повысить точность и скорость решения операторами задач по управлению и дало значительный технико-экономический эффект, равный 150—200 тыс. руб. в год в расчете на одну крупную АСУ типа энергообъединения Урала или системы «Старт», что является доказательством большого народнохозяйственного значения комплексных научно-технических и инженерно-психологических исследований, направленных на рационализацию информационных систем и средств в АСУ.

Проведенные исследования позволяют сформулировать некоторые психологические требования к перспективным системам отображения информации в АСУ.

Главнейшим требованием является гибкость СОИ, возможность отображения состояния основной схемы системы и отдельных объектов с широким диапазоном варьирования степени детализации и сенсорного выделения информации соответственно конкретному значению и роли каждого объекта и функциональной связи. В каждом отдельном случае автоматически или по вызову оператора на системе отображения должны

представляться как бы диагностический разрез системы, ее структура, наиболее адекватная данной ситуации, минимизирующая сложность решения возникшей оперативной задачи. Реальной динамической системе, равно как и друг другу, могут быть адекватны только динамические оперативно-информационная и оперативно-психическая модели, выраженные на оптимально согласованных языках.

Гибкость системы отображения предполагает возможность изменения состава информации, темпа ее поступления, психофизических характеристик сигналов, удаленности средств отображения от оператора (в зависимости от требуемой стратегической оценки или скрупулезного прослеживания сложных графических связей) и других характеристик. Поэтому необходимо особо подчеркнуть важность разработки теории информационно-адаптивных систем, включая сюда и информационно-демпфирующие, и оперативно-адаптивные системы.

Особым требованием к информационным системам является их противоинтерференционное действие: наряду с накоплением и наглядным отображением данных статистической диагностики, т. е. вероятностных связей между комбинациями сигналов и истинным состоянием объекта, должны четко выделяться отличительные признаки редких (вообще и в практике конкретного оператора в особенности) ситуаций. Отображение степени достоверности информации, в первую очередь советов ЭВМ, связано с проблемой оптимального синтеза информации детерминистской (однозначно определенной и, возможно, отработанной до уровня алгоритма решения оперативной задачи) и стохастической (в частности, предназначенной для решения проблемных задач), а также конкретной и абстрактной. Для абстрактного уровня оперативно-психической модели системы предстоит разработать адекватный язык, универсальный с точки зрения управления определенными классами систем и обеспечивающий общение человека с ЭВМ без громоздкой перешифровки.

Контуры такого языка предсказать сейчас трудно, ясно только, что естественный язык человеческого общения, равно как и современные формальные языки, мало походит на идеальный язык обмена информацией и решение задач в процессе оперативного управления.

Разработка такого языка далеко выходит за рамки теории отображения информации и включает обширный комплекс психологических, социальных, педагогических, лингвистических, математических и научно-технических проблем, подход к решению которых требует особых научно-организационных форм, создания общей теории и методологии взаимодействия между операторами, между оператором и ЭВМ.

Одним из перспективных принципов организации взаимодействия мы считаем построение индивидуально-адаптивных систем «гибридного интеллекта».

Таким системам должны быть свойственны функционирование партнеров как единого оператора; перераспределение лидерства и вспомогательных функций между партнерами в зависимости от сложившейся ситуации; совместный анализ и синтез информации, адаптированный к индивидуальным сенсорным и интеллектуальным особенностям и конкретному состоянию партнера, принимающего в данном случае решение, и направленный на формирование у него адекватной модели ситуации как основы принятия решения; обработка и представление информации в виде, соответствующем оптимальным значениям факторов сложности решения; отображение советов партнеров с категоричностью, адекватной их достоверности; постоянный (в отличие от эпизодического, «задачного») контакт между партнерами в процессе деятельности.

Нам представляется, что принципы «гибридного интеллекта» могут оказаться эффективными не только в системах оперативного управления, но и в других видах интеллектуального творчества в условиях взаимодействия.

Список литературы

1. **Агейкин Д. И., Галактионов А. И., Фаткин Л. В.** Направления исследований в инженерной психологии. — «Приборы и системы управления», 1967, № 10, с. 47—52.

2. **Адамар Ж.** Исследование психологии процесса изобретения в области математики, М., «Советское радио», 1970, 130 с.

3. **Ананьев Б. Г.** Комплексное изучение человека и психологическая диагностика. — «Вопросы психологии», 1968, № 6, с. 21—33.

4. **Артибилов М. А., Венда В. Ф., Поляков В. А.** Определение оптимального объема информации при управлении энергообъединением. — «Техническая эстетика», 1971, № 8, с. 7—10.

5. **Ахутин В. М., Неймарк Г. С.** Методика исследования процесса решения в эргатических системах. Труды VI Всесоюзного симпозиума по кибернетике, Тбилиси, «Мецниереба», 1972, с. 48—52.

6. **Березкин Б. С., Зинченко В. П.** Исследование деятельности оператора в процессе информационного поиска. — В кн.: Проблемы инженерной психологии. М., «Наука», 1966, с. 57—62.

7. **Боумен У.** Графическое представление информации. Пер. с англ. Под ред. В. Ф. Венды. М., «Мир», 1971, 225 с.

8. **Бусленко Н. П. и др.** Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). М., Физматгиз, 1962, 310 с.

9. **Бюнайюн Р.** и др. Линейное программирование при многих критериях: метод ограничений. — «Автоматика и телемеханика», 1971, № 8, с. 81—90.

10. **Веккер Л. М.** Восприятие и основы его моделирования. Изд. ЛГУ, 1964, 230 с.

11. **Венда В. Ф.** Оператор и машина. М., «Знание», 1964, 48 с.

12. **Венда В. Ф.** Комплексная автоматизация и задачи технической эстетики. — «Техническая эстетика», 1964, № 10, с. 4—7.

13. **Венда В. Ф.** Применение методов моделирования для исследования элементов блочного операторского пункта. — В кн.: Проблемы инженерной психологии. Изд. ЛГУ, 1964, с. 62—63.

14. **Венда В. Ф.** О создании и некоторых перспективах исследования одной системы «человек и автомат». — В кн.: Система «человек и автомат». М., «Наука», 1965, с. 62—69.

15. **Венда В. Ф.** Мнемосхемы и мнемозинаки. — «Социалистический труд», 1966, № 9, с. 83—92.

16. **Венда В. Ф.** Применение методов теории массового обслуживания для регулирования интенсивности потока сигналов. — В кн.: Кибернетиче-

ские пути совершенствования измерительной аппаратуры. Л., изд. НТО Приборпром, 1967, с. 73—74.

17. **Венда В. Ф.** Об экспериментальном исследовании восприятия показаний приборов с применением моделей объектов. — В кн.: Проблемы инженерной психологии. М., изд. ВНИИТЭ, вып. 2, 1968, с. 272—277.

18. **Венда В. Ф.** Предисловие к книге Вудсона и Коновера «Справочник по инженерной психологии для инженеров и художников-конструкторов». М., «Мир», 1968, с. 5—13.

19. **Венда В. Ф.** Последовательность решения основных эргономических задач в процессе художественного конструирования индикационных систем.— В кн.: Эргономика и НОТ. Свердловск, 1968, с. 15—24.

20. **Венда В. Ф.** О некоторых методах регулирования потока информации, поступающей к оператору. — В кн.: Проблемы приема информации. Тбилиси, «Мецниереба», 1969, с. 24—28.

21. **Венда В. Ф.** Средства отображения информации. Эргономические исследования и художественное конструирование. М., «Энергия», 1969, 300 с.

22. **Венда В. Ф.** Научная организация труда и проектирование оборудования (эргономические основы проектирования). — В кн.: Научная организация труда в машиностроении. М., «Машиностроение», 1969, с. 135—154.

23. **Венда В. Ф.** Конструирование многокомпонентных средств отображения информации с учетом эргономических требований. — «Механизация и автоматизация производства», 1969, № 12, с. 39—41.

24. **Венда В. Ф., Митькин А. А.** Принципы исследования и построения мнемосхем. — В кн.: Эргономика: принципы и рекомендации. М., изд. ВНИИТЭ, вып. 1, 1970, с. 95—99.

25. **Венда В. Ф.** Информационная техника и эргономика. М., «Знание», 1970, 48 с.

26. **Венда В. Ф.** Эргономические требования к отображению оперативной информации. — «Социалистический труд», 1970, № 2, с. 61—69.

27. **Венда В. Ф., Зинченко В. П., Мунипов В. М.** Проективная эргономика. — «Техническая эстетика», 1970, № 7, с. 1—2.

28. **Венда В. Ф.** Вводная статья и дополнение к книге «Эргономика». М., «Мир», 1971, с. 5—22 и 385—419.

29. **Венда В. Ф.** Сложность оперативных задач и структура средств отображения информации. — В кн.: Системы отображения информации. Киев, Изд. НТО Приборпром, 1972, с. 16—17.

30. **Венда В. Ф., Паншин Б. Н.** Сравнительное экспериментальное исследование индивидуального и группового вариантов информационной модели объекта. — «Техническая эстетика», 1971, № 2, с. 24—25.

31. **Венда В. Ф., Какузин Ф. Л.** Командно-информационные мнемосхемы в техническом обслуживании систем. — «Техническая эстетика», 1971, № 11, с. 17—18.

32. **Венда В. Ф.** Эргономический анализ и рационализация деятельности аппаратчиков на Щекинском химкомбинате. — «Социалистический труд», 1971, № 2, с. 68—83.

33. **Венда В. Ф.** Проблемы адаптивных систем взаимодействия типа «гибридного интеллекта». — В кн.: Психологические проблемы «искусственного интеллекта». М., изд. ИП АН СССР, 1975, с. 54—63.

34. **Венда В. Ф., Смолян Г. Л.** Эргономика и системотехника. — «Техническая эстетика», 1972, № 12, с. 7—9.

35. **Венда В. Ф., Гордон В. М.** Экспериментальное исследование процесса решения оперативных задач. — В кн.: Эргономика: принципы и рекомендации, вып. 3. М., изд. ВНИИТЭ, 1971, с. 171—196.

36. **Машинная** диагностика и информационный поиск в медицине. Под редакцией А. А. Вишневского, И. И. Артоболевского, М. Л. Быховского. М., «Наука», 1969, 120 с.

37. **Вудсон У., Коновер Д.** Справочник по инженерной психологии для инженеров и художников-конструкторов. Пер. с англ. под ред. В. Ф. Венды. М., «Мир», 1968, 518 с.

38. **Выготский Л. С.** Мышление и речь. Соцэкгиз. М., 1934, 220 с.

39. **Галактионов А. И.** Представление информации оператору. М., «Энергия», 1969, 180 с.
40. **Гвишиани Д. М.** Организация и управление. М., «Наука», 1972. 530 с.
41. **Гегелло А. И., Минервин Г. Б.** и др. Очерки теории архитектурной композиции. М., Стройиздат, 1960, 590 с.
42. **Геллерштейн С. Г.** Действия, основанные на предвосхищении, и возможности их моделирования в эксперименте. — В кн.: Проблемы инженерной психологии, изд. ЛГУ, 1966, вып. 2, с. 112—114.
43. **Глезер В. Д., Цуккерман И. И.** Информация и зрение. М., Изд. АН СССР, 1961, 140 с.
44. **Глушков В. М.** Гносеологическая природа информационного моделирования. — «Вопросы философии», 1963, № 10, с. 56—65.
45. **Глушков В. М.** и др. Человек и вычислительная техника. Киев, «Наукова думка», 1971, 370 с.
46. **Гурова Л. Л.** Функция наглядно-образных компонентов в решении задач. — «Вопросы психологии», 1969, № 5, с. 46—53.
47. **Дементьев В. А.** и др. Оперативное управление комплексно-автоматизированным блоком. — «Механизация и автоматизация производства», 1965, № 2, с. 47—52.
48. **Добрушин Р. Л., Пинскер М. С.** Память увеличивает пропускную способность. — В кн.: Проблемы передачи информации, т. 5, 1969, № 1, с. 36—40.
49. **Дракин В. И., Зинченко В. П.** Послесловие к книге В. Н. Пушкина «Оперативное мышление в больших системах», М., «Энергия», 1965, с. 350—368.
50. **Дубровский В. Я., Щедровицкий Л. П.** Вступительная статья к сборнику «Инженерно-психологическое проектирование». Изд. МГУ, 1970, с. 3—25.
51. **Журавлев Г. Е., Вучетич Г. Г., Веселов В. И.** Методика и некоторые результаты исследования времени реакции человека с помощью ЭВМ. В кн.: Проблемы инженерной психологии. Ч. 2, М., Изд. АПН СССР, 1968, вып. 3, с. 12—26.
52. **Завалова Н. Д., Ломов Б. Ф., Пономаренко В. А.** Проблема распределения функций в автоматизированной системе «человек-машина». Материалы IV Всесоюзного съезда общества психологов. Тбилиси, «Мицниереба», 1971, с. 112—114.
53. **Запорожец А. В.** и др. Восприятие и действие. М., «Просвещение», 1967, 350 с.
54. **Зараковский Г. М.** Психофизиологический анализ трудовой деятельности. М., «Наука», 1966, 150 с.
55. **Зараковский Г. М., Медведев В. И.** Классификация ошибок операторов. — «Техническая эстетика», 1971, № 10, с. 12—16.
56. **Зефельд В. В.** Художественное конструирование операторских пунктов. М., «Машиностроение», 1969, 152 с.
57. **Зинченко В. П., Панов Д. Ю.** Игровые системы управления и информационные модели. — В кн.: Система «человек и автомат». М., «Наука», 1965, с. 18—26.
58. **Зинченко В. П., Вергилес Н. Ю.** Формирование зрительного образа. Изд. МГУ, 1969, 180 с.
59. **Зинченко В. П., Мунипов В. М., Смолян Г. Л.** Эргономические основы организации труда. М., «Экономика», 1974, 350 с.
60. **Зинченко В. П., Венда В. Ф., Гордон В. М.** О фазах процесса решения задач. Материалы IV Всесоюзного съезда общества психологов. Тбилиси, «Мецниереба», 1971, с. 361—362.
61. **Зинченко Т. П.** О модели информационного поиска. — «Вопросы психологии», 1970, № 2, с. 151—154.
62. **Ивашкин Ю. А.** Матричный метод отображения оперативной информации. — «Приборы и системы управления», 1970, № 10, с. 85—90.
63. **Ильин В. А.** Большие системы телемеханики. М., «Энергия», 1967, 105 с.

64. **Инженерная** психология в приборостроении. (Сборник тезисов второй Ленинградской научно-технической конференции). Л., «Энергия», 1972, 134 с.
65. **Карибский В. В., Пархоменко П. П., Согомонян Е. С.** Техническая диагностика объектов контроля. М., «Энергия», 1967, 340 с.
66. **Киколов А. И.** Умственно-эмоциональное напряжение за пультом управления. М., «Медицина», 1967, 210 с.
67. **Конопкин О. А., Нерсесян Л. С.** Сравнительная оценка словесных и наглядных обозначений на пульте управления. — «Проблемы инженерной психологии». Изд. АПН СССР, вып. 2, 1968, с. 117—119.
68. **Крылов А. А.** Инженерная психология в приборостроении. — В кн.: Инженерная психология в приборостроении. Л., изд. НТО Приборпром, 1967, с. 25—34.
69. **Крылов А. А.** Человек в автоматизированных системах управления. Изд. ЛГУ, 1972, 220 с.
70. **Кудин П. А., Ломов Б. Ф.** Использование средств технической эстетики для повышения эффективности операций приема и передачи информации человеком. В кн.: Проблемы инженерной психологии. Изд. ЛГУ, 1965, с. 125—143.
71. **Кузьмин В. П.**, Проблемы системности в теории и методологии К. Маркса М., «Знание», 1974. 60с.
72. **Ларичев О. И.** Человеко-машинные процедуры принятия решения. — «Автоматика и телемеханика», 1971, № 12, с. 139—146.
73. **Леонтьев А. Н.** Проблема деятельности в психологии. — «Вопросы философии», 1972, № 9, с. 95—108.
74. **Леонтьев А. Н., Гиппенрейтер Ю. Б.** Анализ системного строения восприятия. Доклады АПН РСФСР, 1959, № 2, с. 26—40.
75. **Инженерная** психология. Под ред. А. Н. Леонтьева, В. П. Зинченко, Д. Ю. Панова. Изд. МГУ, 1964, 397 с.
76. **Ломов Б. Ф.** Человек и техника. М., «Советское радио», 1966, 470 с.
77. **Ломов Б. Ф., Рубахин В. Ф.** Состояние и тенденции развития инженерной психологии. — «Труды третьей Всесоюзной конференции по инженерной психологии». Калинин, изд. ДНТП, 1970, с. 5—17.
78. **Ломов Б. Ф.** Состояние и перспективы развития психологии в СССР в свете решений XXIV съезда КПСС. — «Вопросы психологии», 1971, № 5, с. 3—19.
79. **Ломов Б. Ф.** О роли практики в развитии общей психологии. — «Вопросы психологии», 1971, № 1, с. 26—35.
80. **Лурия А. Р.** Курс лекций по общей психологии. Изд. МГУ, 1965, 120 с.
81. **Малев В. В.** Определение числовых характеристик распределения вероятности исправной работы систем противоаварийной автоматики. — «Техническая кибернетика», 1967, № 1, с. 84—89.
82. **Медведев В. И.** Функциональные состояния оператора. — В кн.: Эргономика: принципы и рекомендации. М., изд. ВНИИТЭ, 1970, с. 137—154.
83. **Милерян Е. А.** О надежности оператора в различных режимах работы. — «Вопросы психологии», 1971, № 4, с. 60—68.
84. **Минервин Г. Б.** Архитектоника промышленных форм. М., изд. ВНИИТЭ, 1971, 180 с.
85. **Мунипов В. М.** Эргономика и техническая эстетика. — «Техническая эстетика», 1969, № 7, с. 1.
86. **Небылицын В. Д.** Надежность работы оператора в сложной системе управления. — В кн.: Инженерная психология. Изд. МГУ, 1964, с. 358—367.
87. **Нейман Дж., Моргенштерн О.** Теория игр и экономическое поведение. М., «Наука», 1970, 380 с.
88. **Нестерук В. Ф.** Применение методов теории игр для распознавания двух объектов при наличии помех в канале. — «Проблемы передачи информации», т. 5, 1969, № 1, с. 92—98.
89. **Николаев В. И.** Определение времени, затрачиваемого оператором на решение задач по управлению судовой энергоустановкой. — «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», 1965, № 4, с. 171—187.

90. **Озерной В. М.** Принятие решений (обзор). — «Автоматика и телемеханика», 1971, № 11, с. 178—196.
91. **Ошании Д. А., Венда В. Ф.** О некоторых путях повышения эффективности операторского труда в системах «человек и автомат». — «Вопросы психологии», 1962, № 3, с. 47—61.
92. **Ошаиин Д. А.** Роль оперативного образа в выявлении информационного содержания сигнала. — «Вопросы психологии», 1969, № 4, с. 24—33.
93. **Панайоти Б. Н., Пьяизниа Л. Я., Чебаков В. А.** Об игровом подходе к задачам распознавания. — «Техническая кибернетика», 1970, № 5, с. 79—90.
94. **Панов Д. Ю., Зинченко В. П.** Построение систем управления и проблемы инженерной психологии. — В кн.: Инженерная психология. М., «Прогресс», 1964, с. 7—21.
95. **Пашутин А. М., Веида В. Ф.** Эргономика и художественное конструирование средств индикации и органов управления. — В кн.: Архитектура и художественное конструирование в судостроении. Вып. III, Л., «Судостроение», 1968, с. 61—73.
96. **Петров Б. Н., Кочубиевский И. Д., Уланов Г. М.** Информационные аспекты управления технологическими процессами. — «Техническая кибернетика», 1967, № 4, с. 33—40.
97. **Платонов К. К.** Психологические вопросы теории тренажеров. — «Вопросы психологии», 1961, № 4, с. 58—71.
98. **Пугачев В. Н.** Определение вероятностных характеристик системы методом статистических испытаний. — «Техническая кибернетика», 1971, № 5, с. 24—31.
99. **Пул Г.** Основные методы и системы индикации. Л., «Энергия», 1969, 407 с.
100. **Пушкин В. Н., Поспелов Д. А., Ефимов Е. И.** Психологическая теория мышления и некоторые пути развития кибернетики. — «Вопросы психологии», 1971, № 2, с. 35—48.
101. **Резников Л. О.** Гносеологические основы семиотики. Изд. ЛГУ, 1964, 120 с.
102. **Репкииа Г. В.** Исследование оперативной памяти. — «Проблемы инженерной психологии», 1965, вып. 3, с. 89—101.
103. **Рубахин В. Ф.** Структурно-эвристическая концепция обработки первичной информации. Материалы IV Всесоюзного съезда общества психологов. Тбилиси, «Мицниереба», 1971, с. 124—126.
104. **Рубахин В. Ф.** Психологические основы обработки первичной информации. Л., «Наука», 1974. 296 с.
105. **Саати Т.** Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М., «Советское радио», 1965, 350 с.
106. **Самофалов К. Г., Белоусов К. Н., Каустов В. А.** Некоторые оценки методов представления информации оператору. — «Механизация и автоматизация управления», 1970, № 5, с. 54—65.
107. **Серебрянников О. Ф.** Эвристические принципы и логические исчисления. М., «Наука», 1970, 279 с.
108. **Системы** автоматического управления крупными энергоблоками тепловых электростанций. (Сборник статей). М., изд. ЦНИИТЭИ Приборостроения, 1968, 153 с.
109. **Смоляи Г. Л., Майзель Н. М.** Эргономика за рубежом. — «Техническая эстетика», 1972, № 7, с. 9—13.
110. **Соколов Е. Н.** Статистическая модель наблюдателя. — В кн.: Инженерная психология. Изд. МГУ, 1964, с. 68—104.
111. **Стратонович Р. Л.** К теории оптимального управления. Достаточные координаты. — «Автоматика и телемеханика», 1962, № 7, с. 13—21.
112. **Стратонович Р. Л.** Об одной нестационарной адаптационной задаче динамического программирования. — «Техническая кибернетика», 1970, № 5, с. 48—62.
113. **Темников Ф. Е., Афонин В. А., Дмитриев В. И.** Теоретические основы информационной техники. М., «Энергия», 1971, 424 с.

114. **Темииков Ф. Е., Ивашкии Ю. А.** О представлении массовой информации перед оператором в системах наблюдения и управления. В кн.: Вычислительная техника для управления производством, отв. ред. В. В. Солодовников. М., «Машииостроение», 1969, с. 151—164.

115. **Теплов Б. М.** Об уме полководца. — «Ученые записки МГУ», 1945, № 90, с. 57—73.

116. **Техника** систем индикации. Под ред. Лаксеиберга. М., «Мир», 1970, 490 с.

117. **Тихомиров О. К.** Структура мыслительной деятельности человека. Изд. МГУ, 1969, 210 с.

118. **Тихомиров О. К.** К анализу факторов, создающих трудность решеиия задачи человеком. — В ки.: Проблемы инженерной психологии. Вып.3. М., изд. АПН СССР, 1968, с. 202—205.

119. **Тода М., Шуфорд Э. Х.** Логика систем: введение в формальную теорию структуры. — В кн.: Исследование по общей теории систем. М., «Прогресс», 1969, с. 175—196.

120. **Ховард Дж.** Электронные системы отображения информации. М., Воеиздат, 1966, 320 с.

121. **Чайиова Л. Д., Веида В. Ф., Гордои В. М.** К вопросу объективиой оценки восприятия цифровой информации. Материалы III Всесоюзного съезда общества психологов. М., изд. АПН СССР, 1968, с. 301—303.

122. **Чачко А. Г.** Синтез систем отображения информации. — В ки.: Информациоиные материалы. М., 10 (47), изд. ВИНИТИ, 1970, с. 3—29.

123. **Шаров В. А.** О моделировании сложных систем управления с оператором. — «Приборы и системы управления», 1970, № 10, с. 62—67.

124. **Эргоиомика** (Сборник статей). Пер. с польск. под ред. В. Ф. Венды. М., «Мир», 1971, 420 с.

125. **Ярбус А. Л.** Роль движений глаз в процессе зрения. М., «Наука», 1965, 180 с.

126. **Arnheim R.** Visual Thinking. Education of Vision. London, Studio Vista, 1965, 120 p.

127 **Arnheim R.** Image and Think. «Sign, Image and Symbol», London, Stydio Vista, 1966. 300 p.

128. **Adey W. R.** Hippocampal slow waves. AMA Arch. Neurol., 3, 1960, N 1, pp. 20—28.

129. **Akers S.** Threshold Logic and Two-Person, Zero-Sum Games. Proc. Annals Symp. Switching Theory and Logical Design., 1960—1961, Sept. pp. 117—134.

130. **Arrow K. G.** Social Choise and Individual Values. 2nd Ed., John Wiley and Sons. N. Y., 1963, 320 p.

131. **Ashby W. Ross.** «Frontiers of integrated control — what can we learn from the brain? «Joint Automat Control, New York, 1962, p.p. 84—98.

132. **Box G. E. P., Hunter T. S.** Mult i-factor experiments design for exploring response surfases. Annals of Mathematical Stat., 28, 195 (1957). pp. 51—60.

133. **Chapanis A.** The Relevance of Laboratory Studies to Practical Situations. «Ergonomics», 1967, v. 10, N 5, pp. 43—51.

134. **Chapanis A.** Stereotypes in control-display movement relatioships for right- and left-handed operators. «Ergonomics in mashine design», v. 1, Genewa, 1969, pp. 235—244.

135. **Edwards W.** Probabilistic information processing systems for diagnosis and action. Proc. 2-nd Cong. on the Information System Sciences. Wash.; D. C. Spartan, 1965, pp. 144—151.

136. **Experiments** in visual perception. Ed. by M. D. Vernon, London, Penguin Books, 1968, 435 p.

137. **Fishburn P. C.** Methods of Estimating Additive Utilities. Manag. Sci., v. 13, N 7, 1967. pp. 175—182.

138. **Fishburn P. C.** Utility theory. Manag. Sci. v. 14, N 5, 1968. pp. 220—232.

139. **Howard R. A.** Dynamic probabilistic systems. v. 1 Markov models. v. 2. Semi — markov and decision processes. New-York, 1971, 620 p.

140. **Kogi K., Saito Y. A.** A Factor-Analytic Study of Phase Discrimination in Mental Fatigue. «Ergonomics», 1971, v. 14, N 1, pp. 87—94.
141. **Miller S. W.** Display Requirement for Future Man-Machine Systems. «IEEE Transactions on Electronic Devices», 1971, v. ED-18, N 9. pp. 241—250.
142. **Murell K. F. H.** Human Performance in Industry. Bermingam, 1965, 350 p.
143. **Newell A., Simon H. A.** The logic theory machine. A complex information processing system. «IRE Trans. on inform. theory», 1956, v. 2, N 3, pp. 101—120.
144. **Oshanin D. A., Wenda W. F.** Wege zur Erhohung des Arbeitseffets des Operaters in System «Mensch-Automat», Probleme und Ergebnisse der Psychologie, Berlin, 1962, p. 31—46.
145. **Piaget J.** «La Psychologie de L'Intelligence». Paris, 1952, 390 p.
146. **Rebiffe R., Zayana O., Tarriere C.** Determination des zones optimales pour l' emplacement des commandes manuelles dans l'espace do travail. «Ergonomics», 1969, N 6, p.p. 270—286.
147. **Siegel A. I., Wolf J. J.** Man-machine simulation models psychosocial and performance interaction. New York, Willey, 1969. 350 p.
148. **The** human operator in complex system. Ed. by Singleton W. T. Easterby R. S., Whitfield D. London, Taylor and Fransis, 1967. 400 p.
149. **Sonntag L.** Designing Human-Oriented Codes. «Bell Laboratories Records», 1971, v. 49, N 2, pp. 113—125.
150. **Venda V. F., Oshanin D. A.** Unele cai de crestere a eficientei munci operatorului in sistemul «om-automat», Analele Romino-Sovietice, 4 (47), 1962. 83—97.
151. **Venda V. F., Mitkin A. A.** Resultati di uno studio obiettivo sull'attualita di un operatore. La Scuola in Azione, Milano, 1969, N 3, pp. 80—95.
152. **Venda V. F.** Эргономические исследования устройств отображения информации. «Ergonomics in machine design», v. 1, Geneva, 1969, p.p. 117—126.
153. **Venda V. F., Mitkin A. A.** Опыт объективного изучения деятельности оператора. «Ergonomics in machine design», v. 1, Geneva, 1969, pp. 135—144.
154. **Venda V. F.** Quelques perspectives de recherche dans la construction d'un systeme «Homme et automate». Ch. III, «L'homme dans les systemes automatises», Dunod, Paris, 1971, pp. 101—118.
155. **Warner H. D., Heimstra N. W.** Effects of Intermittent Noise on Visual Search Tasks of Varying Complexity. «Perception and Motor Skills», 1971, v. 32, N 1, pp. 129—141.
156. **Whitman R.** The influence of oculomotor systems on visual perception. Wash,, 1969. 390 p.

Оглавление

Валерий
Федорович
ВЕНДА

ИНЖЕНЕРНАЯ ПСИХОЛОГИЯ

и синтез систем
отображения
информации

Редактор издательства
инж. Е. Е. Скворцов

Художник
С. Г. Абглин

Художественный
редактор
В. В. Лебедев

Технические редакторы:
Л. П. Гордеева,
Л. А. Макарова

Корректор
О. Е. Мишина

Сдано в набор 7/I 1975 г.
Подписано к печати 18/IX 1975 г.
Т-14584
Формат $60 \times 90^1/_{16}$.
Бумага для глубокой печати
Усл. печ. л. 25,0. Уч.-изд. л. 27,25
Тираж 20000 экз.
Заказ 123. Цена 1 р. 65 к.

Издательство «Машиностроение»,
107885, Москва, Б-78,
1-й Басманный пер., 3

Ленинградская типография № 6
Союзполиграфпрома
при Государственном
комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли
193144, Ленинград, С-144,
ул. Моисеенко, 10

